EL CALENTAMIENTO GLOBAL • EL ENIGMA DEL CALENDARIO MAYA

# INVESTIGACION y CIENCIA

MAYO 2004
5,50 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

## SPIRIT, EL ROBOT EXPLORADOR



VIENTOS
EN LOS PLANETAS GIGANTES

ESTADISTICAS DE LOS CONFLICTOS BELICOS

LAS MARISMAS DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA

LA TIERRA TIEMBLA EN SILENCIO

00332
9 770210 136004

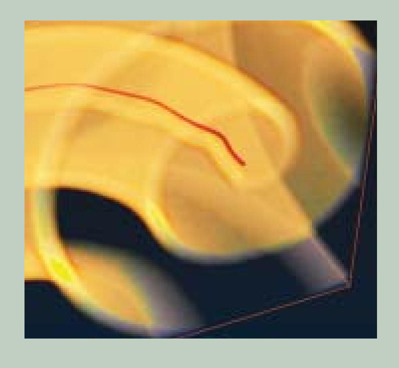



Edición española de
SCIENTIFIC
AMERICAN

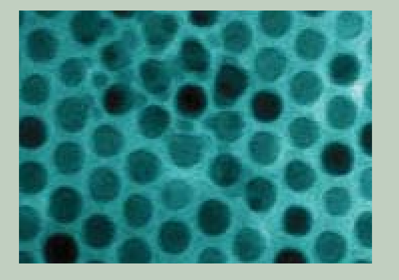
Mayo de 2004

Número 332

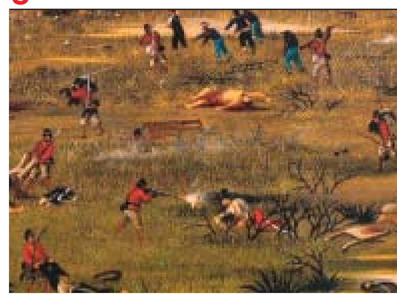


















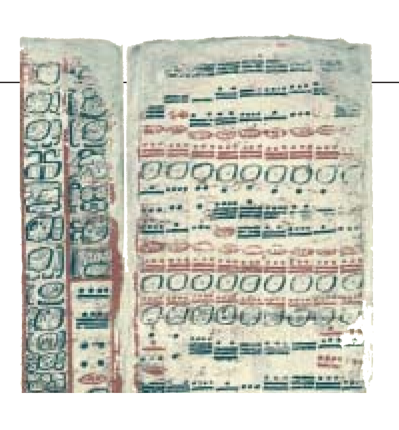








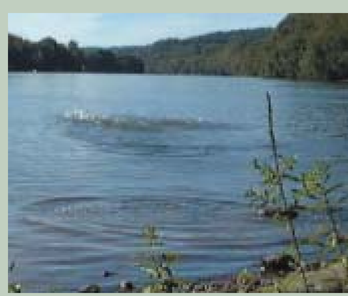






















DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

**DISTRIBUCION**

**para España:**

**LOGISTA, S. A.**
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

**para los restantes países:**

**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

**PUBLICIDAD**

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

**COLABORADORES DE ESTE NUMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

Luis Bou: *Estadísticas de los conflictos bélicos* y *Aventuras problemáticas*; Juan Pedro Adrados: *Spirit, el robot explorador*; Manuel Puigcerver: *El calentamiento global*; Esteban Santiago: *El cerebro adicto*; Francesc Castelló: *El enigma del calendario maya*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



**Portada:** Daniel Maas, Maas Digital LLC, NASA/JPL/Universidad de Cornell

**SUSCRIPCIONES**

**Prensa Científica S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

**Precios de suscripción:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 60,00 euro | 110,00 euro |
| Extranjero | 85,00 euro | 160,00 euro |

**Ejemplares sueltos:**

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.






ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



# HACE

## ...cincuenta años

**COMIDA RADIACTIVA.** "Se dijo que el segundo ensayo termonuclear en la zona de pruebas de las islas Marshall liberó 600 veces más energía que la bomba atómica de Hiroshima. La peor parte se la llevó un pesquero japonés, el *Dragón Afortunado*, que transportaba su pesca de atunes y tiburones en su bodega abierta. Sorprendido a 80 millas de la explosión, recibió una ducha de ceniza blanca que cubrió de ampollas las epidermis de los 23 pescadores y contaminó la pesca. Cuando el barco llegó a puerto, parte del pescado fue vendido antes de que el gobierno japonés pudiera impedirlo. De la noche a la mañana, los japoneses dejaban de comer pescado; las amas de casa iban a la compra con contadores Geiger; el precio del atún caía a un tercio, con escasos compradores. La prensa japonesa trató aquella ducha de 'polvo mortífero' como la tercera bomba atómica sobre Japón."

**PUES SÍ, LES GUSTABA IKE.** "Pero sólo con los demócratas de 1948 que dejaron su partido, el general Eisenhower no habría ido a la Casa Blanca. ¿Cuáles fueron los motivos ocultos bajo aquel brusco transvase de votos hacia el candidato republicano? Se acometió un estudio a escala nacional para ofrecer una respuesta lo más completa posible a tan intrigante pregunta. Un considerable número de cada grupo parecía no ser 'partidista' acerca de las cualidades personales de los candidatos y, sin embargo, en porcentajes sorprendentemente altos de cada grupo de votantes se prefería el general al gobernador Stevenson. Tan fuerte predilección por Eisenhower como persona parece que fue el único factor que unió a todos los grupos que lo votaron."

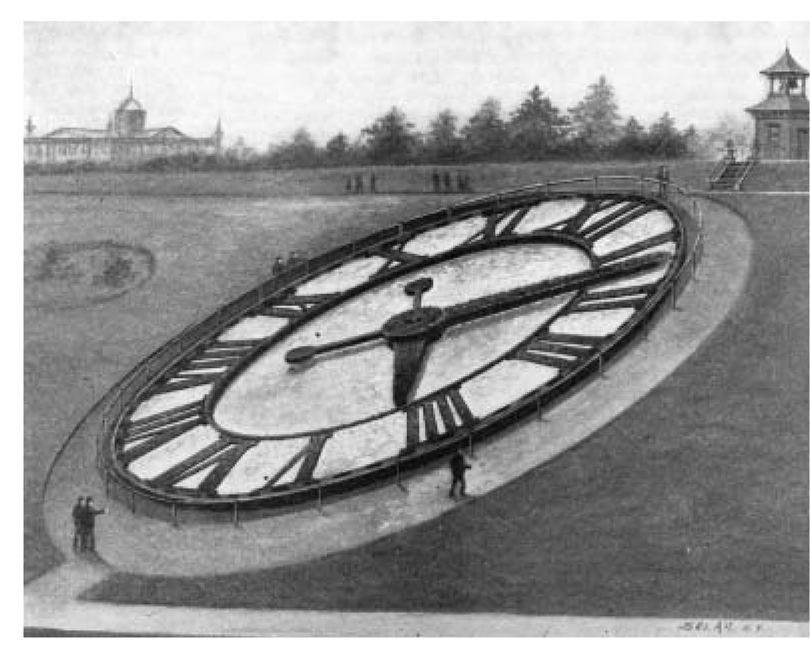
## ...cien años

**UN RELOJ DE FLORES.** "La Exposición Comercial de Louisiana se inauguró en St. Louis, conmemorando uno de los centenarios más importantes de la historia americana. Su reloj floral será dieciséis veces mayor que cualquier otro reloj existente en el mundo (*véase la ilustración*). Funciona con precisión, ya que bajo las enredaderas y otras plantas, expertos artesanos han construido un mecanismo de relojería. Las manecillas son unos largos canalones de acero, rellenos de tierra fertilizada que nutrirá las enredaderas que recubrirán el metal. Los números de las horas serán plantas de alto follaje oscuro."

**HIDROELECTRICIDAD Y $CO_2$.** "En San Francisco, el precio de la corriente eléctrica para la industria o la iluminación es casi exactamente un séptimo que hace pocos años. Es posible alimentar con energía a las máquinas de una factoría costera, desde las nieves fundentes y glaciares de la Rocosas, con energía para las máquinas a un precio menor que el de la energía generada por el vapor. Se ha estimado que la cantidad de ácido carbónico exhalado al año por la población de la ciudad de Nueva York ronda las 450.000 toneladas, y que esa cifra es menos de un tres por ciento del producido por la quema de combustibles en dicha ciudad; por ello, cabe esperar que, al eliminar un foco tan grande de contaminación atmosférica, incluso el aire de nuestras grandes urbes sea casi tan puro como el del campo."

## ...ciento cincuenta años

**LA ORCA.** "El teniente Maury afirma que el capitán Royes, ballenero de Nueva Inglaterra, le envió una carta donde describía dieciséis tipos de ballenas, una de ellas un extraño pez para el que el teniente no halló nombre en libro alguno. El capitán la llamaba 'ballena asesina' y decía que medía casi diez metros de largo, rendía unos cinco barriles de aceite y tenía dientes fuertes y afilados, con una aleta en la espalda, muy robusta, de unos ciento veinte centímetros de largo. Esta 'asesina' es un ser extremadamente belicoso. Ataca a las ballenas francas, aferrándolas por la garganta, mordiendo hasta que la sangre sale a chorros, o hasta que otra 'asesina' se acerca y devora la lengua del atormentado animal. La lengua de una ballena franca es una masa grasa, que pesa tres o cuatro toneladas. La 'asesina' recorre el océano de polo a polo, no hay mar donde no esté, y todos los viejos cazadores de ballenas se han cruzado con ella."



Un reloj de flores, Saint Louis, 1904.

# APUNTES

## CLIMATOLOGIA Y OCEANOGRAFIA

### La subida de las aguas

El nivel de los mares subió a lo largo del siglo XX. Dista de quedar claro, sin embargo, cuánto y por qué. El ascenso se determina de dos maneras; una directa, midiendo las mareas, y otra indirecta, evaluando y sumando los dos factores que pueden desencadenarlo: el correspondiente al volumen (la dilatación térmica del agua) y el debido a la masa (vinculado a la fusión de los hielos continentales). El método directo arrojaba una subida de cerca de dos milímetros por año a lo largo del siglo XX. El segundo coincidía en el resultado hasta que un nuevo cálculo del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático aportó en 2001 una cifra mucho menor: medio milímetro para la contribución de volumen y menos aún para la de masa. La diferencia de resultados entre ambos enfoques se ha atribuido bien a una temperatura anormalmente alta de los lugares donde se han medido las mareas, lo que habría exagerado el valor global del ascenso, bien a que la contribución del componente de masa se hubiera estado subestimando. La segunda interpretación concuerda mejor con las mediciones obtenidas por satélite. Dan éstas una subida de dos milímetros y medio por año en el último decenio. Además, un nuevo estudio avala la segunda hipótesis. Descarta que las mediciones de mareas estén sesgadas y establece que el componente de masa duplica o triplica el de volumen. Se trata de una novedad inquietante, porque, fuese cual fuese la magnitud que se le calculase a la subida de las aguas, se atribuía sobre todo a la dilatación térmica. Para escapar de esta conclusión, se esgrime que la masa del océano debería haber estado redistribuyéndose durante el pasado siglo, con un descenso del nivel de grandes zonas alejadas de las costas. Dilucidar si es así requiere nuevas mediciones altimétricas por satélite.

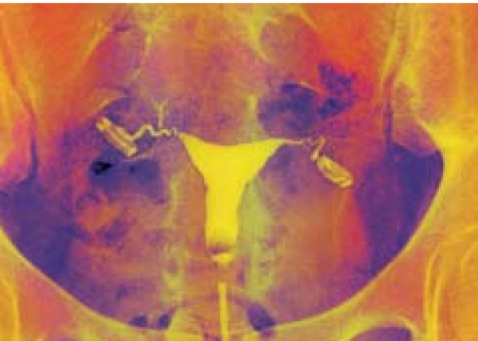


## REPRODUCCION

### Ovulos

Puede que sea falso que la mujeres nazcan con todos los óvulos de que en adelante dispondrán. Se ha descubierto que las hembras de ratón conservan en su madurez la capacidad de producir células generadoras de oocitos. En las hembras jóvenes, los folículos (oocitos encapsulados en células de sostén) morían con suficiente rapidez como para que la disponibilidad de óvulos se hubiera agotado en días o semanas. Aun así, persistían fértiles hasta más allá del año de edad; además, la cantidad global de folículos permanecía casi inalterada. Sugiere esta observación que las hembras poseen algún tipo no descubierto de célula madre que genera continuamente células reproductoras, al igual que los machos. Unas 60 células cercanas a cada ovario poseían sustancias químicas características de esas células madre. Si esos hallazgos valiesen para los humanos, habrá que volver a examinar las teorías sobre el envejecimiento del sistema reproductor de las mujeres y el modo en que el tabaco, la quimioterapia y la radiación afectan a la fertilidad.

*—Charles Choi*



**Más ovulación: ¿una disponibilidad ilimitada?**

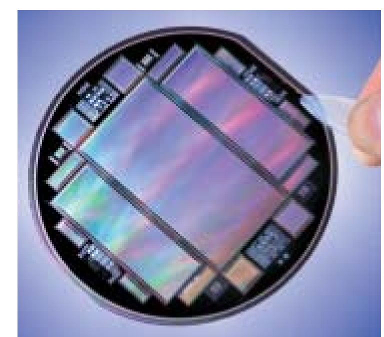
## FISICA

### La opacidad de los experimentos

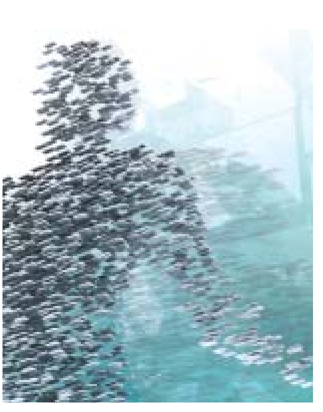
En 2001 se dijo que la constante de estructura fina no era en realidad constante, sino que había aumentado a lo largo de la historia del cosmos. Parecía así demostrarlo los espectros de absorción de cuásares muy antiguos. La variación de esa “constante”, ligada a la intensidad de la interacción electromagnética, entraña una variación de la velocidad de la luz. De ahí el revuelo producido en torno a algunas teorías que incluyen ese efecto, en especial la de João Magueijo, autor de “Más deprisa que la luz”, un libro de divulgación. Hasta ahora, el resultado experimental anunciado en 2001, y refinado en 2003, por J. K. Webb y sus colaboradores ha permanecido en el limbo, ni aceptado ni rechazado. Pero hace unos meses aparecieron nuevas mediciones, ofrecidas por Chand y colaboradores. Incompatibles con las de Webb, sí eran compatibles con que no haya variado la constante. La verdad es que el trabajo de Chand ofrece en realidad

SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC. *(centro)*

dos estimaciones distintas. El resultado depende de cuáles se suponga que fueron las abundancias isotópicas relativas de diversos elementos, el magnesio sobre todo, hace diez mil millones de años. El grupo de Chand comunica también un aumento de la constante con el tiempo. La historia sigue. Acaba de aparecer un tercer grupo que propone que los isótopos pesados podrían haber abundado más, con respecto al más ligero, en tiempos lejanos y además en medida suficiente para explicar los resultados de Webb sin tener que recurrir a una constante de estructura fina.



Los dispositivos acoplados a la carga, como éste del telescopio Keck, han contribuido a los avances de la astronomía. Pero entender lo que se ve no es más fácil por ello.



FISICA

## Diálogo "físico" con los lectores

Lee Smolin explicaba aquí en un artículo reciente que la gravedad cuántica de bucles predice que los rayos gamma de mayor energía se propagan más deprisa que los de energía menor. Esa teoría funde la mecánica cuántica y la relatividad general de un modo que conduce a la existencia de "átomos" de espaciotiempo. Jacob Rosenberg, de la NASA, nos ha recordado que esta agencia anunciaba en diciembre una refutación de la predicción de los rayos gamma. Smolin replica que tal resultado negativo se basa en la premisa antieinsteiniana, contraria también a la teoría cuántica de bucles, de que existe un marco de referencia privilegiado. Kelly Mills, por otra parte, saca a colación un trabajo de la Universidad de Alabama que refuta la cuantización del tiempo, al menos en la escala supuesta por la teoría de bucles. Smolin considera que se trata de un trabajo equivocado porque modela el espacio-tiempo como un ente clásico y no como un ente cuántico.

CONDUCTA HUMANA

## Base biológica

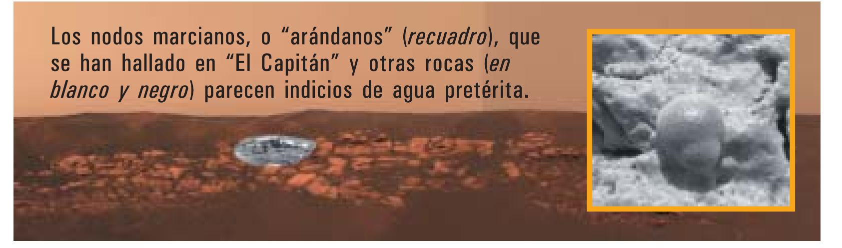
En un trabajo internacional, científicos ingleses y checos manifiestan que las mujeres resultan más atractivas en los días fértiles de su ciclo menstrual. ¿Cómo se demuestra algo semejante? Se toman fotos de 48 mujeres en esas fechas y unos diez días después. Se enseñan estas imágenes a ciento y pico mujeres y otros tantos hombres, la mitad de Newcastle, la mitad de Praga, y se les pregunta en cuál de cada par estaba mejor la retratada, sin que supiesen a qué fase correspondía cada una. La elección se hizo dos veces; en una de ellas se suprimían digitalmente cabello y orejas. Varones y mujeres de Praga parecen ser más sensibles al embellecimiento hormonal: con las imágenes sin tapar, cerca de un 60 % de las mujeres y alrededor de un 55 de los hombres se quedaron con las fotos del período fértil. Las inglesas hacían lo mismo en un porcentaje sólo un poco inferior a ése de los hombres de Praga, pero los ingleses parecían más bien indiferentes entre unas fotos y otras; en cambio, con las fotos sin cabello ni orejas elegían a la fértil un poco más a menudo que sus compañeras del ensayo. En Praga, empataban con ellas en esas condiciones, aunque la supresión capilar no modificaba sus porcentajes, sino que disminuía un poco el de las mujeres. En estas variadas y ligeras desviaciones del 50/50 consiste la prueba ofrecida. Craig Roberts, primer firmante del artículo, ha estudiado también la reacción ante las camisetas usadas de hombre y el sudor de las axilas. Cree —como otros— que se pueden distinguir inconscientemente diferencias genéticas que afectan al olor del sudor (las hembras preferirían varones con un genoma muy distinto del suyo).

MARTE

## Destellos en la llanura

El agua podría explicar los misteriosos destellos marcianos. Thomas Dobbins y William Sheehan predecían en mayo de 2001 la aparición de nuevos destellos para un momento determinado. Habían comprobado que anteriores destellos se habían visto en regiones situadas de manera que la geometría resultante produciría reflexiones especulares, en nubes con cristales de hielo e incluso en hielo depositado en la superficie. En junio de 2001 se volvieron a observar los destellos conforme a lo previsto. No era una prueba final de la existencia de hielo superficial. Sin embargo, el hallazgo del robot Opportunity de indicios de la acción de agua en rocas de Meridiani Planum añade verosimilitud a la hipótesis de que los destellos marcianos se deben a la reflexión en hielo superficial.

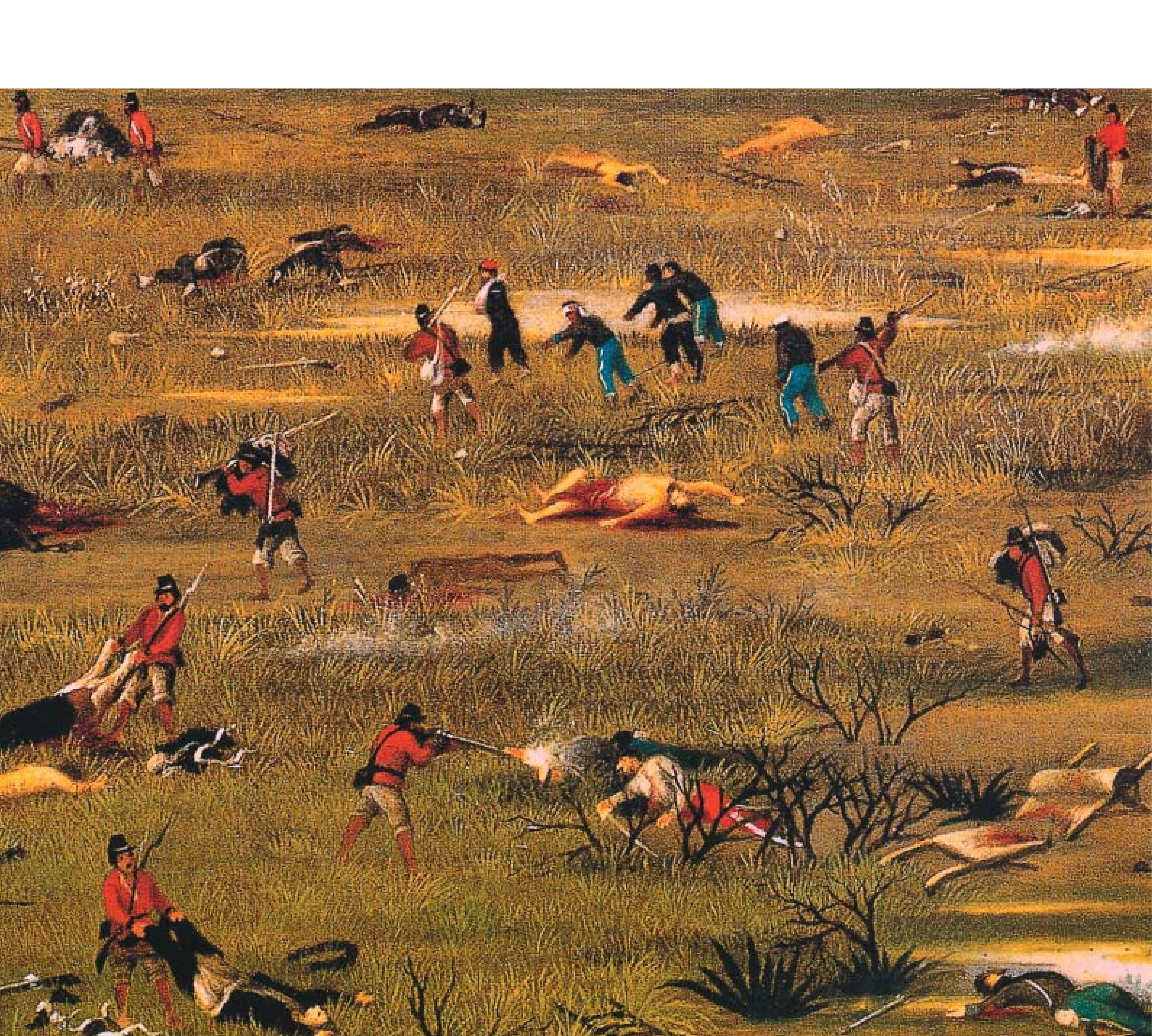
*—J. R. Minkel*



Los nodos marcianos, o "arándanos" (*recuadro*), que se han hallado en "El Capitán" y otras rocas (*en blanco y negro*) parecen indicios de agua pretérita.

LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN BERKELEY *SPL* (*arriba*); KEN BROWN (*centro*); NASA/JPL/CORNELL (*abajo, imagen de fondo*), NASA/JPL/U.S. GEOLOGICAL SURVEY (*inserto*)

# Estadísticas de los conflictos bélicos



## Los conflictos armados son comparables a seísmos. Podrían ser graduados en una escala logarítmica, similar a la de Richter. No parece haber una forma clara de preverlos o impedirlos

Brian Hayes

Contemplemos el fenómeno de la guerra con frialdad y distanciamiento, como si estuviésemos observando los disparates de otra especie en un planeta lejano. Desde tan olímpico punto de vista, la guerra parecerá un pasatiempo baladí. Demográficamente, apenas tiene importancia. Las bajas vienen a suponer en torno al uno por ciento de todos los fallecimientos; en muchos lugares, son más los óbitos por suicidio y, en muchos más todavía, las muertes por accidente. Si entendiéramos que lo principal es evitar la pérdida de vidas, más se lograría evitando los ahogamientos y los siniestros de tráfico que por la abolición de la guerra.

Pero nadie en nuestro planeta puede observar la guerra desde tan alta perspectiva y tan austera ecuanimidad. Ni siquiera los dioses del Olimpo lograban verse al margen de los conflictos terrenos. Hay en el entrechocar de las armas una fuerza especial que provoca las emociones más violentas —piedad y amor, miedo y odio— que tornan nuestra respuesta a las bajas en el campo de batalla desmesurada con respecto a las estadísticas vitales. La fuerza de la guerra, cuando llega, arroja al tacho, sin contemplaciones, los aspectos tranquilos de la vida: nadie permanece insensible. La mayoría de nosotros opta por uno u otro bando, pero incluso entre quienes meramente desean que cesen los combates, los sentimientos son de gran intensidad. ("Militante antimilitarista" no es en absoluto un oxímoron.)

Las mismas e inflamadas pasiones que confieren a la guerra su apremiante interés humano se interponen también en su estudio académico. El imparcial enjuiciamiento de las acciones, rectas o malvadas, parece del todo imposible. La superación de las barreras impuestas por la cultura e ideología propias constituye, asimismo, un problema, por no mencionar las limitaciones que imponen el tiempo y el lugar. Acostumbramos ver todas las guerras a través del cristal del conflicto en curso; excavamos en la historia en busca de lecciones que respalden la finalidad del momento.

Una defensa frente a tales distorsiones consiste en la recopilación estadística de datos relativos a muchas guerras, tomados de numerosas fuentes, con la esperanza de que al menos algunos sesgos lleguen a compensarse entre sí, aunque sea en parte, y puedan salir a la luz las regularidades auténticas. Trátase de un método burdo, de fuerza bruta, no exento de errores, pero nada tenemos que parezca más prometedor. Uno de los pioneros de este estudio cuantitativo del fenómeno bélico fue Lewis Fry Richardson, un meteorólogo británico de ambiciosa, aunque prematura, incursión en la predicción del tiempo por métodos numéricos, quien también dedicó parte de su obra al estudio matemático de los conflictos armados.

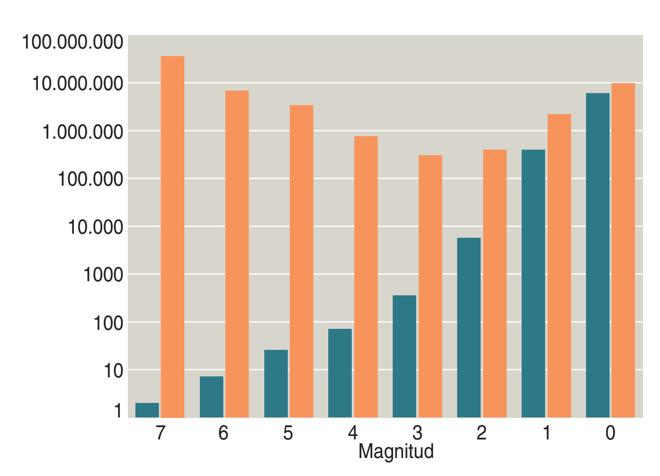
1. LA GRAN GUERRA EN LA PLATA (1865-1870), o guerra de la triple alianza, figura entre las peores calamidades de la historia moderna; sin embargo, es poco conocida fuera de los países implicados: Paraguay, Uruguay, Argentina y Brasil. Esta guerra alcanzó magnitud 6, lo que significa que murieron alrededor de un millón de combatientes. Se muestra aquí un fragmento de "Tras la batalla de Curupaytí", obra del pintor argentino Cándido López, que perdió la mano derecha en Curupaytí y se vio obligado, en consecuencia, a aprender a pintar con la izquierda. El cuadro se expone en el Museo Nacional de Bellas Artes de Buenos Aires.

American Scientist

### Guerra y paz

Richardson nació en 1881, en una próspera familia de cuáqueros del norte de Inglaterra. Estudió física en Cambridge con J. J. Thompson, donde adquirió gran pericia en la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales por métodos numéricos. Tal clase de métodos aproximados constituye hoy una importante industria matemática, pero en aquellos tiempos ni atraían gran interés, ni eran distintivo de una elección sagaz de carrera profesional. Tras una serie de nombramientos de corta duración —todos alejados de la senda conducente a la cátedra— Richardson encontró refugio profesional en la investigación meteorológica, campo en el que efectuó aportaciones importantes a la teoría de la turbulencia atmosférica. En 1916, dimitió de su puesto para prestar servicio en Francia como conductor de ambulancias. Llevó a cabo la mayor parte de los cálculos de su modelo de predicción meteorológica entre turno y turno en el frente. (La predicción no resultó un éxito, pero la idea en que se inspiraba era válida; todos los modernos métodos de predicción del tiempo se fundan en métodos similares.)

Tras la guerra, la atención de Richardson se fue desplazando poco a poco desde la meteorología hacia cuestiones asociadas a la guerra y a las relaciones in-




**2. LA MAGNITUD DE UNA GUERRA,** según la definición de Lewis Fry Richardson, es el logaritmo decimal del número de muertes. Las barras azules indican el número de guerras del intervalo de 1820 a 1950 que pertenecen a cada magnitud; las barras naranja representan el total de muertes producidas por las guerras de esa magnitud. Dos conflagraciones de magnitud 7 dan cuenta del 60 por ciento de todas las muertes.

ternacionales. Comprobó que parte de su instrumental matemático seguía siendo de utilidad. En particular, modelizó las carreras de armamentos mediante ecuaciones diferenciales. La mortífera espiral de la escalada —en la que el arsenal de una potencia induce que otra aumente su armamento propio, a lo cual la primera responde con más armas todavía— tiene presta representación en un sistema de dos ecuaciones diferenciales. Richardson demostró que una carrera de armamentos sólo podía estabilizarse si la "fatiga y el dispendio" de la preparación de la guerra llegaban a superar la percepción de amenaza por parte de los enemigos. Este resultado no brilla ni por su profundidad ni por su innovación; aun así, el análisis de Richardson fue objeto de mucho comentario (en su mayor parte, escéptico), porque las ecuaciones ofrecían la posibilidad de una determinación *cuantitativa* del riesgo de guerra. Si fuera posible confiar en las ecuaciones de Richardson, a los observadores les bastaría fijarse en los gastos en armamentos para preparar un pronóstico bélico similar a una predicción meteorológica.

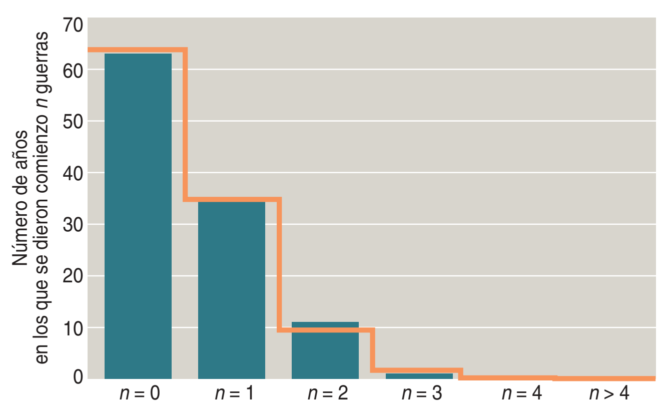
Los modelos matemáticos de las carreras de armamentos han experimentado ulteriores refinamientos desde los tiempos de Richardson. Se les hizo incluso un hueco en las deliberaciones de índole política durante la fase de "destrucción mutua asegurada" de la Guerra Fría. Pero las indagaciones del propio Richardson tomaron una dirección un tanto diferente. Basarse en los arsenales presupone que una de las causas determinantes de la guerra es la acumulación de armamentos, o al menos, que tiene una fuerte correlación con ella. Otras teorías sobre el origen de las guerras cargarían el acento en otros factores: la situación económica de las naciones, las diferencias de cultura e idioma, la eficacia de la diplomacia y la mediación. No hay escasez de tales teorías; el problema estriba en elegir entre ellas. Richardson proponía que las teorías sobre la guerra podían, y debían, ser evaluadas con fundamentos científicos, contrastándolas con datos relativos a guerras reales. Por lo cual se dispuso a recopilar tales datos.

No fue Richardson el primero en tomar esta senda. En los primeros años del siglo XX, se confeccionaron varias listas de guerras. Otros dos catálogos de guerras fueron compilados por Pitirim A. Sorokin, un sociólogo de origen ruso, y por Quincy Wright, de la Universidad de Chicago, en los años treinta y cuarenta del pasado siglo. Richardson comenzó su propia recopilación hacia 1940 y siguió trabajando en ella hasta su muerte, en 1953. No fue el suyo el conjunto más amplio de datos, pero sí el más idóneo para el análisis estadístico.

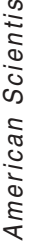
Aunque Richardson publicó algunos de sus escritos sobre la guerra en artículos de revistas y en folletos, sus ideas sólo alcanzaron difusión tras la edición de dos volúmenes póstumos, aparecidos en 1960. Su trabajo sobre carreras de armamentos está recogido en *Arms and Insecurity*; los estudios estadísticos figuran en *Statistics of Deadly Quarrels*. La colección de sus artículos se ha recogido, además, en los dos volúmenes de *Collected Papers*, publicados en 1993. También me he basado en un estudio realizado en 1980 por David Wilkinson, de la Universidad de California en Los Angeles, que ofrece los datos de Robertson en un formato racionalizado y mucho más legible.

## "La cosificidad falla"

El catálogo de conflictos de *Statistics of Deadly Quarrels* abarca un período que se extiende, aproximadamente, desde 1820 hasta 1950. Era el propósito de Richardson contabilizar todas las muertes producidas durante este intervalo por acción intencionada de otra persona. Contempla, por tanto, no sólo las guerras, sino también episodios de tan gran violencia, así como los asesinatos; excluye, en cambio, los accidentes, los resultados de negligencias y los desastres naturales. Optó, asimismo, por no contar las muertes provocadas por las hambrunas y enfermedades que las guerras traen consigo, razonando que las causas múltiples son demasiado difíciles de desenredar. (¿Fue la Primera Guerra Mundial "causa" de la epidemia de gripe de 1918-1919?)




**3. LA FRECUENCIA** con que se desencadenan las guerras (*barras azules*) sigue una distribución de Poisson (*línea naranja*), lo que induce a pensar que el comienzo de una guerra es un proceso esencialmente aleatorio.

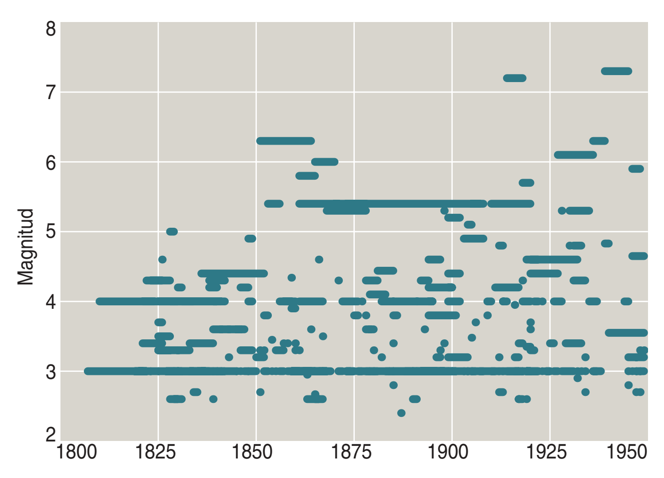


La decisión de situar en un mismo plano a guerras y asesinatos buscaba la polémica. A quienes sostienen que "el asesinato es un crimen egoísta y abominable, mientras que la guerra es una aventura heroica y patriótica", Richardson les responde: "Se pueden hallar casos de homicidio que un gran grupo de personas ha condenado como asesinato, mientras que otro gran grupo los ha condonado o alabado como guerras legítimas. Tales cosas ocurrieron en Irlanda en 1921 y están ocurriendo ahora en Palestina". (Resulta deprimente que los ejemplos de Richardson sigan siendo tan válidos, transcurridos 50 años.) Pero si Richardson desechó las distinciones morales entre las diversas formas de homicidio, sí reconoció dificultades metodológicas. Las guerras pertenecen al dominio académico de la historia, y los asesinatos, al de la criminología, y resulta difícil reconciliar los datos estadísticos de ambos grupos. La gama de conflictos con muertes que media entre el asesinato y la guerra se torna todavía más problemática. Los desórdenes, incursiones e insurrecciones han sido demasiado pequeños y demasiado frecuentes para merecer la atención de los historiadores, y su carácter, demasiado político para los criminólogos.

En el caso de las guerras grandes, Richardson compiló su lista sirviéndose de los textos de historia, empezando con las entradas de la *Enciclopedia Británica* y pasando después a fuentes más diversas y especializadas. Extrajo los datos sobre asesinatos de informes nacionales sobre el delito. Para salvar el hiato entre guerras y asesinatos trató de interpolar y extrapolar, valiéndose también de otros medios de estimación, pero reconoció que sus resultados en este campo eran débiles e incompletos. Situó conjuntamente guerras civiles e internacionales en una misma lista, aduciendo que la diferencia entre ellas era, a menudo, difusa.

Una interesante enseñanza del ejercicio de Richardson consiste, precisamente, en lo difícil que puede resultar la extracción de datos cuantitativos coherentes a partir de los registros históricos. Más fácil parece ser el recuento de galaxias inaccesibles o de invisibles neutrinos que el de las guerras que han barrido naciones enteras hace tan sólo un siglo. Ciertos aspectos de la historia militar son, ciertamente, motivos de disputa; no se puede esperar que todos los historiadores estén de acuerdo sobre quién empezó una guerra o quién fue el vencedor. Pero resulta incluso que hechos básicos, como quiénes fueron los combatientes, cuándo empezaron y cuándo concluyeron los combates, o cuántas bajas hubo, pueden ser notablemente difíciles de fijar. Muchas guerras se funden en una, se escinden o no tienen un punto claro de comienzo o fin. Como Robertson señala, "la cosificidad falla".

Para organizar sus datos, Robertson tomó de la astronomía una idea crucial: clasificó las guerras y otros enfrentamientos atendiendo a su *magnitud*, que se define como el logaritmo en base 10 del número total de muertes. Así, una campaña terrorista que provoca 100 muertes tiene magnitud 2, y una guerra con 1 millón de bajas es un conflicto de magnitud 6. Un asesinato que produzca una sola víctima es de magnitud 0 (dado que $10^0 = 1$). La elección de la escala logarítmica se debió, en gran parte, a la necesidad de habérselas con




**4. LA DISTRIBUCION CRONOLOGICA de las guerras del catálogo de 315 conflictos recopilado por Richardson no revela ninguna regularidad manifiesta. Aunque la vista crea detectar un aparente incremento de las guerras de gran magnitud, los ensayos estadísticos de Richardson no llegaron a confirmar esta tendencia.**

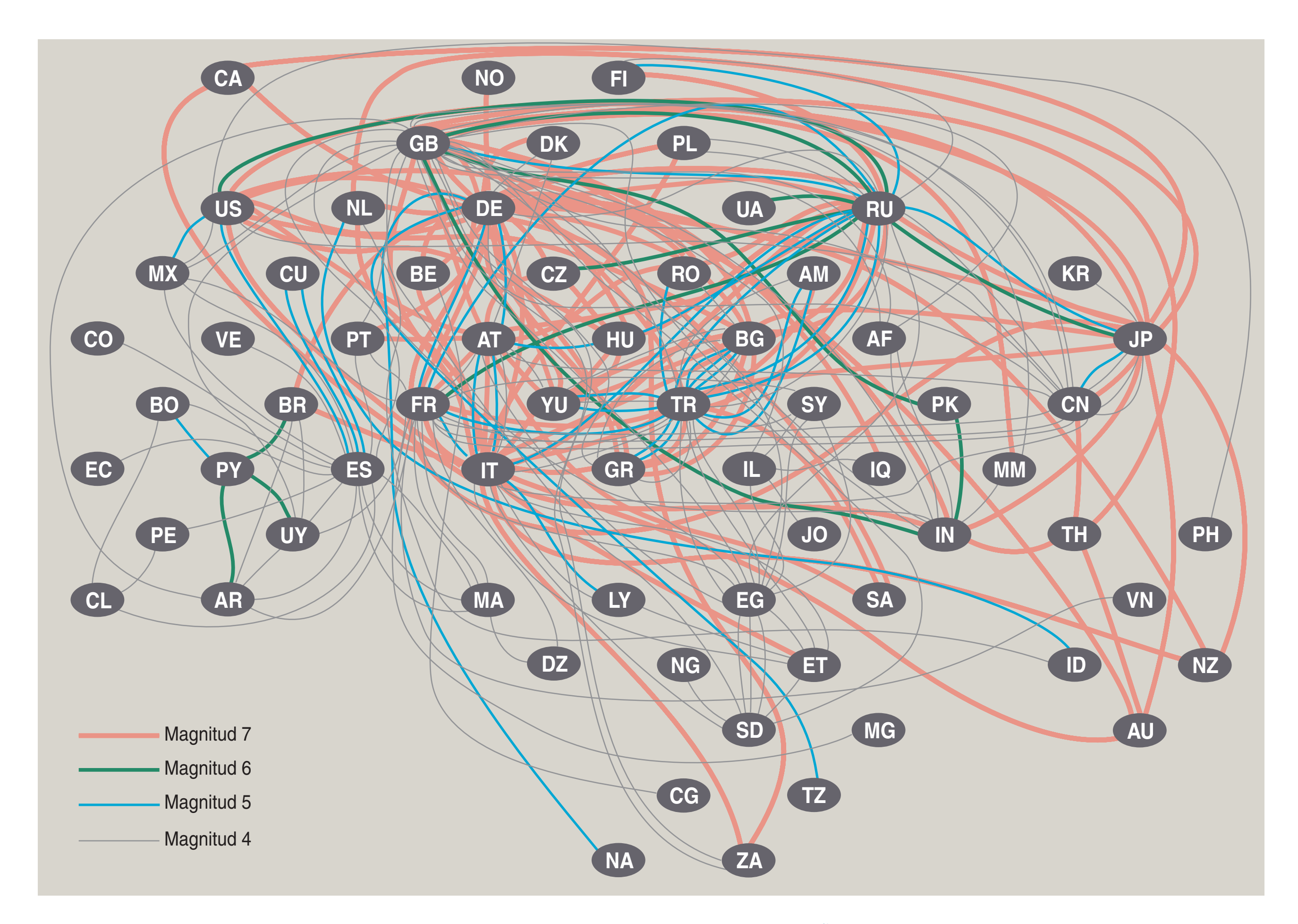
las limitaciones de los datos disponibles: aunque rara vez se cuenta con datos precisos sobre el total de bajas, suele poderse estimar su logaritmo con un error de ±0,5. (Una guerra de magnitud 6 ± 0,5 pudo haber causado entre 316.228 y 3.162.278 muertes.) Pero el uso de magnitudes logarítmicas ofrece también una ventaja psicológica: es posible plasmar el espectro entero de la violencia humana en una escala única.

## Violencia aleatoria

La lista de guerras compilada por Richardson (en la versión refinada por Wilkinson) menciona 315 conflictos de magnitud 2,5 o mayor (es decir, con al menos unos 300 muertos). No nos sorprende que las dos guerras mundiales del siglo XX encabecen el elenco: son los únicos conflictos de magnitud 7 de la historia humana. Sí sorprende la medida en la que las guerras mundiales predominan sobre el total general de muertes. Entre ambas dan cuenta de unos 36 millones de muertes, lo que supone alrededor del 60 por ciento de todas las muertes en los conflictos del intervalo de 130 años. Atendiendo a su tamaño, la categoría siguiente se encuentra en el otro extremo del espectro: la constituyen los sucesos de magnitud 0 (disputas en las que murieron de 1 a 3 personas), que fueron responsables de 9,7 millones de interfectos. Así pues, el resto de las 315 guerras registradas, juntamente con todos los millares de conflictos de tamaño intermedio, produjeron menos de la cuarta parte de todas las muertes.

La lista de guerras de magnitud 6 mueve también a la sorpresa, si bien de otro tipo. Richardson identificó siete de estos conflictos, el menor de los cuales provocó medio millón de muertes, y el mayor, en torno a 2 millones. Se trata, claramente, de grandes convulsiones en la historia del mundo; se podría pensar que cualquier persona culta podría mencionarlos casi todos. Pruebe a hacerlo el lector. Los siete conflictos con millones de muertes que Richardson enumera, son, por orden cronológico y con los nombres adoptados por

American Scientist




**5. ESTA TELARAÑA DE GUERRAS** está construida a partir de los datos de Richardson para conflictos internacionales de magnitud mayor que 3,5. Dos naciones se hallan conectadas por una línea si llegaron a hostilidades reales (no sólo una declaración formal). El color y el espesor de la línea indican la magnitud de la guerra en su conjunto, no el conflicto concreto que surgió entre los dos países. No figuran las guerras civiles; además, el diagrama pasa por alto los muchos cambios políticos del país (como la formación y la fragmentación de Yugoslavia). Los dígrafos designan a las naciones por los nombres que tienen asignados como dominios de Internet.

él: la rebelión de Taiping (1851-1864), la guerra civil norteamericana (1861-1865), la gran guerra de La Plata (1865-1870), las secuelas de la revolución bolchevique (1918-1920), la primera guerra comunista en China (1927-1936), la guerra civil de España (1936-1939) y las revueltas comunales en la península indostánica (1946-1948).

Al examinar la lista de las 315 guerras en una serie cronológica, Richardson se preguntó si existirían pautas o regularidades discernibles. ¿Se están dando con una frecuencia mayor o menor? ¿Está aumentando su magnitud típica? ¿Existen periodicidades en el registro u otras tendencias responsables de que estos acontecimientos se arracimen?

Una hipótesis nula que resulta útil para afrontar tales cuestiones propone que las guerras son sucesos aleatorios independientes y que la probabilidad de que se inicie una guerra en un día cualquiera es la misma. Tal hipótesis implica que el número medio de nuevas guerras por año debería obedecer a una distribución de Poisson, que describe la forma en que tienden a organizarse los acontecimientos cuando la aparición de cada suceso es, individualmente, rara, pero son muchas las oportunidades de que se produzca. La distribución de Poisson es la ley adecuada para la tabulación de desintegraciones radiactivas, metástasis cancerosas, tornados, entradas a una sede de la Telaraña, y, en un ejemplo famoso y temprano, las muertes de soldados de caballería causadas por coces. Aplicada a las estadísticas de conflictos con muerte, la ley de Poisson dice que, si $p$ es la probabilidad de que empiece una guerra a lo largo de un año, la probabilidad de que empiecen $n$ guerras en un año cualquiera es $e^{-p} p^n/n!$. Al asignar, en la fórmula, valores numéricos a sus variables vemos que, cuando $p$ es pequeño, los años en los que no comienza una guerra son los más probables, seguidos por los años en los que se inicia sólo una; para una $p$ fija, cuando $n$ crece, la verosimilitud de ver un año con $n$ guerras decrece muy rápidamente.

En la figura 3 se muestran, en contraposición, la distribución de Poisson y los datos de Richardson para un grupo de guerras de magnitud 4. El ajuste es muy bueno. Richardson efectuó un análisis similar de las fechas en que las guerras terminaron —"las llegadas de la paz"— con idéntico resultado. Realizó la misma comprobación con la lista de Quincy Wright y volvió

American Scientist

a encontrar buena concordancia. Así pues, los datos no dan motivo para pensar que las guerras sean otra cosa que accidentes con una distribución aleatoria.

Richardson también examinó sus datos en busca de indicios de tendencias a largo plazo en la incidencia de la guerra. A pesar de que en la representación cronológica de los datos aparezcan ciertas regularidades que llaman la atención, Richardson llegó a la conclusión de que las tendencias no son lo bastante claras como para descartar las fluctuaciones aleatorias. "La colección, en su conjunto, no refleja ninguna tendencia hacia un número mayor, ni tampoco menor, de disputas fatales." Sí encontró alguna ligera indicación de "contagio": la presencia de una guerra en curso puede aumentar en cierta medida la probabilidad de que empiece otra.

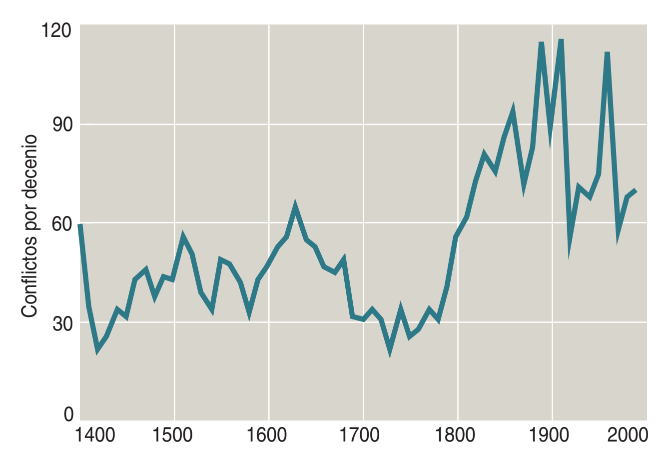
## Ama a tu próximo

Si la dimensión temporal no logra explicar gran cosa sobre la guerra, ¿qué decir de las relaciones espaciales? ¿Es mayor, o menor, que el promedio la probabilidad de que dos países vecinos acaben enfrentados? Una y otra hipótesis son defendibles. Los países limítrofes tienen, a menudo, intereses comunes, por lo que más se podría esperar que se convirtieran en aliados que en enemigos. Por otra parte, los vecinos podrían también ser rivales que se disputen parte de unos mismos recursos; e incluso puede que los vecinos sean, sencillamente, un fastidio. La existencia de guerras civiles reafirma que vivir en compañía no garantiza una relación amistosa. (Y en el extremo inferior de la escala de magnitudes, a menudo las personas asesinan a sus parientes.)

La metodología con que Richardson trataba estas cuestiones tenía cierto aroma topológico. En lugar de medir la distancia entre los países, se limitó a preguntar si tenían frontera común. Después, en estudios posteriores, refinó esta noción tratando de medir la longitud de la frontera común, lo que le llevó a una fascinante digresión. Richardson, trabajando con mapas a distintas escalas, fue señalando las longitudes de fronteras y litorales con marcas divisorias, y se percató de que el resultado depende del ajuste de los marcadores; dicho de otro modo, de la unidad de medida. Un litoral que mide 100 pasos de 10 mm no medirá necesariamente 1000 pasos de 1 mm cada uno; es probable que sea más, porque cuanto menores sean las unidades más estrechamente irán siguiendo la irregular línea de costa. Este resultado apareció en una publicación de segundo orden; cuando Benoit Mandelbrot dio con ella por casualidad, la observación de Richardson se convirtió en una de las claves en que se inspiró su teoría de los fractales.

Durante el período abarcado por el estudio de Richardson había unos 60 estados e imperios estables (los imperios contaban, para sus propósitos, como entidades individuales). El número medio de vecinos de esas naciones rondaba en torno a seis (y Richardson ofreció un brillante argumento geométrico, basado en la relación de Euler sobre vértices, aristas y caras de un poliedro, de que tal número *tiene* que ser de aproximadamente seis, para cualquier disposición plausible de los países). Por consiguiente, si las naciones en guerra hubieran elegido a sus enemigas enteramente al azar, habría una probabilidad en torno a un 10 por ciento de que un par cualquiera de beligerantes resultaran ser vecinos. La verdadera proporción de vecinos en guerra es mucho mayor. De 94 guerras internacionales con sólo dos beligerantes, Richardson encontró sólo 12 casos que no compartieran frontera común, lo que induce a pensar que la guerra es, sobre todo, un asunto entre vecinos.






**6. UN CATALOGO DE LOS CONFLICTOS** acontecidos en los últimos seis siglos, en cualquier lugar del planeta, se lo debemos a Peter Brecke, del Instituto de Tecnología de Georgia.

Pero resultaba difícil generalizar esta conclusión a guerras mayores y de mayor extensión, por la razón principal de que las "grandes potencias" son vecinas de todos. Lo mejor que Richardson pudo hacer fue ajustar los datos mediante un modelo bastante complicado que asignaba diferentes probabilidades a los conflictos entre dos grandes potencias, entre una gran potencia y un estado más pequeño, y entre dos naciones de menor rango. Ahora bien, erigir un modelo con tres parámetros para tan reducido conjunto de datos no resulta muy satisfactorio. Además, Richardson concluyó que el "caos" seguía siendo el factor predominante en la explicación de las mayores guerras del mundo: el mismo elemento de aleatoriedad observado en el análisis por series cronológicas opera en este caso, aunque "restringido por la geografía y modificado por su potencia infecciosa".

¿Qué se puede decir sobre los factores sociales, económicos, culturales y otros agentes causales? Mientras compilaba su lista de guerras, Richardson fue anotando los diversos elementos que los historiadores mencionaban como posibles influencias irritantes o apaciguadoras; buscó después correlaciones entre estos factores y la beligerancia. Los resultados fueron casi uniformemente decepcionantes. Las hipótesis del propio Richardson sobre la importancia de las carreras de armamentos no tuvieron confirmación; sólo encontró pruebas de una carrera de armamentos preparatoria en 13 de 315 casos. Richardson fue también un propulsor del esperanto, pero sus esperanzas de que un lenguaje común redujese la probabilidad de conflictos no tuvo sustanciación en los datos. Los indicadores econó-

micos tampoco aportaron nada: las estadísticas ni ratifican la idea de que la guerra es principalmente una lucha entre los ricos y los pobres, ni la opinión de que el comercio entre los pueblos crea vínculos que impiden la guerra.

El único factor social que sí tiene alguna relación detectable con la guerra es la religión. En el conjunto de datos de Richardson, las naciones de diferente religión muestran mayor probabilidad de llegar a combatirse que las que la comparten. Además, algunas sectas parecen, en términos generales, más belicosas (los estados cristianos han participado en un número desproporcionadamente elevado de conflictos). Pero estos efectos no son de gran importancia.

## Más anarquía suelta por el mundo

El residuo de todas estas no-causas de guerra es la mera aleatoriedad: la noción de que las naciones beligerantes chocan unas contra otras, sin más plan ni principio que las moléculas de un gas sobrecalentado. A este respecto, los datos de Richardson sugieren que las guerras se asemejan a los huracanes o los terremotos: no cabe saber por anticipado dónde o cuándo se va a producir un acontecimiento concreto, pero sí conocemos cuántos son de esperar a largo plazo. Podemos calcular el número de víctimas; no podemos, sencillamente, decir quiénes serán.

Esta consideración de las guerras como catástrofes aleatorias nada tiene de reconfortante. Nos quita el control sobre nuestro destino; no deja lugar a la virtud o la maldad individuales. Si las guerras se producen sin más, ¿a quién se ha de culpar? Tal interpretación supondría una lectura errónea de los hallazgos de Richardson. Las "leyes" estadísticas no constituyen reglas que gobiernen el comportamiento ni de las naciones ni de los individuos; se limitan a describir el comportamiento en el conjunto. Un asesino podría aducir en su defensa que la tasa de criminalidad es una cantidad conocida, y que *alguien* ha de contribuir a mantener dicha cifra, pero no es probable que tal argumento se gane la simpatía del jurado. Ni la conciencia ni la responsabilidad personal sufren merma alguna por la adopción de una metodología estadística.

Lo que *sí* resulta deprimente es que los datos no sugieren ningún plan de actuación claro para quienes desean reducir el predominio de la violencia. Al propio Richardson le resultó decepcionante que sus estudios no indicasen ningún remedio evidente. Tal vez sus esperanzas fuesen excesivas. Un físico retirado que lee la *Enciclopedia Británica* no puede hacer nada para asegurar la paz mundial. Pero con conjuntos de datos mayores y más detallados, y con maquinaria estadística más poderosa, tal vez pudieran salir a la luz lecciones de mayor utilidad.

Varios grupos de estudiosos trabajan en la recopilación de datos bélicos, muchos de cuyos miembros pueden retrotraer su legado intelectual hasta Richardson y Quincy Wright. La mayor de tales iniciativas es el proyecto Correlates of War (COW), emprendido en los años sesenta por J. David Singer, de la Universidad de Michigan. Los catálogos COW, al igual que los de Richardson, comienzan en el período posnapoleónico, pero han sido llevados casi hasta la actualidad y enumeran hoy miles de disputas militarizadas. Prosiguen esa línea de investigación Russell J. Leng, del Colegio Middlebury, y Stuart A. Bremer, de la Universidad estatal de Pennsylvania.

Peter Brecke, del Instituto de Tecnología de Georgia, comenzó otra recolección de datos. Su catálogo baja hasta la magnitud 1,5 (alrededor de 30 muertes) y abarca un intervalo temporal mucho más largo, pues se retrotrae hasta el 1400 d.C. Enumera varios miles de conflictos. El hallazgo más intrigante hasta ahora es un impresionante intervalo de calma, de una centuria de duración, en el siglo XVIII.

Aun cuando los limitados datos de Richardson fuesen todo lo que dispusiéramos para proseguir, saldría a la luz un claro imperativo político: se ha de evitar, a toda costa, el choque de los titanes. Por dolorosas que les puedan resultar a los participantes las guerras locales, son las grandes conflagraciones planetarias las que más nos amenazan. Como hemos señalado ya, las dos guerras de magnitud 7 del siglo XX fueron responsables de tres quintas partes de las bajas que Richardson registró. Ahora tenemos en nuestras manos la posibilidad de una guerra de magnitud 8 o 9. Nadie, ante las secuelas de semejante desastre, osaría afirmar que la guerra es demográficamente irrelevante. Tras una guerra de magnitud 9,8, nadie diría absolutamente nada.

## Bibliografía complementaria


LEWIS FRY RICHARDSON (1881-1953): A PERSONAL BIOGRAPHY. Stephen A. Richardson en *Journal of Conflict Resolution*, vol. 1, págs. 300-304; 1957.

STATISTICS OF DEADLY QUARRELS. Lewis F. Richardson, dirigido por Quincy Wright y C. C. Lienau. Boxwood Press; Pittsburgh, 1960.

ARMS AND INSECURITY: A MATHEMATICAL STUDY OF THE CAUSES AND ORIGINS OF WAR. Lewis F. Richardson, dirigido por Nicholas Rashevsky y Ernesto Trucco. Boxwood Press; Pittsburgh, 1960.

THE PROBLEM OF CONTIGUITY. Lewis F. Richardson en *Statistics of Deadly Quarrels. Yearbook of the Society for General Systems Research*, vol. VI, págs. 140-187. Ann Arbor; Mich., 1961.

A STUDY OF WAR, WITH A COMMENTARY ON WAR SINCE 1942. Segunda edición. Quincy Wright. University of Chicago Press; Chicago, Ill, 1965.

THE WAGES OF WAR, 1816-1965: A STATISTICAL HANDBOOK. J. David Singer y Melvin Small. John Wiley; Nueva York, 1972.

DEADLY QUARRELS: LEWIS F. RICHARDSON AND THE STATISTICAL STUDY OF WAR. David Wilkinson. University of California Press; Berkeley, 1980.

PROPHET —OR PROFESSOR?: THE LIFE AND WORK OF LEWIS FRY RICHARDSON. Oliver M. Ashford. Adam Hilger; Bristol, Boston, 1985.

THE SCIENTIFIC MEASUREMENT OF INTERNATIONAL CONFLICT: HANDBOOK OF DATASETS ON CRISES AND WARS. 1945-1988. Claudio Cioffi-Revilla. Lynne Reiner Publishers; Boulder y Londres, 1990.

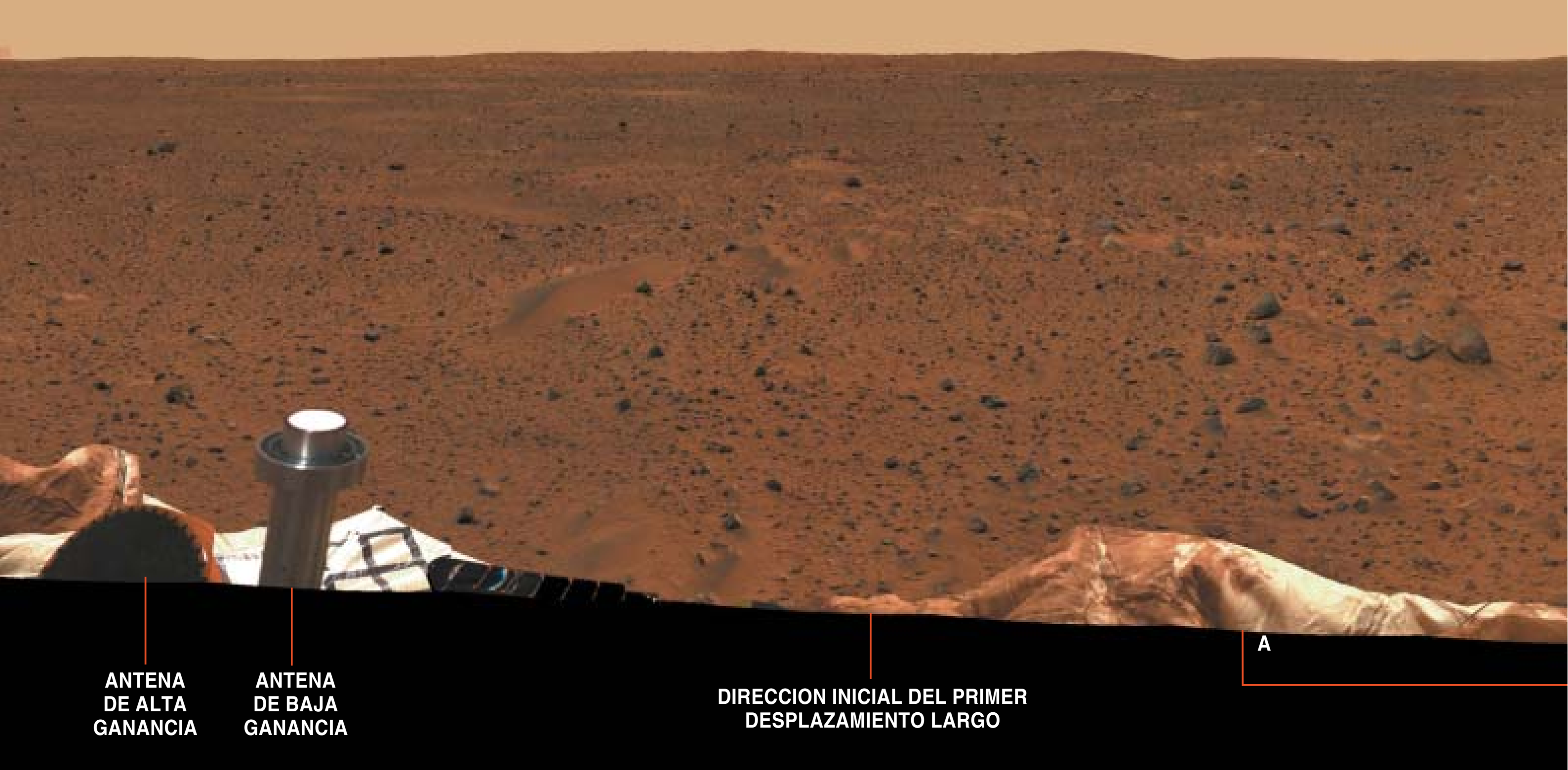
COLLECTED PAPERS OF LEWIS FRY RICHARDSON. Dirigido por Oliver M. Ashford *et al*. Cambridge University Press; Nueva York, 1993.

# Spirit, el robot explorador

El 3 de enero, a las 20:15, hora estándar de la costa del Pacífico —el 4 a las 04:15, hora media de Greenwich—, el robot todoterreno Spirit, aún plegado en su cápsula protectora, se separó de la nave que lo había llevado desde la Tierra. Enseguida entraría en la atmósfera de Marte. Durante varias semanas, los ingenieros y científicos de la misión habían ido confeccionando una lista que recogía con sombrío detalle qué podría salir mal. Que los pernos explosivos no estallasen a tiempo; que fuertes vientos estrellasen la cápsula contra el suelo; que el vehículo se posase boca abajo y quedara irremediablemente encajado entre unas rocas. O que fallasen las comunicaciones por radio. Casi ya en los últimos días, hubo una tormenta de arena en el planeta que redujo la densidad de la atmósfera superior. Para compensarlo, los controladores programaron una apertura más temprana del paracaídas. Ocho horas antes del descenso final de la cápsula, decía Mark Adler, vicedirector del proyecto: "Estamos enviando a muy gran velocidad un complicado aparato a un entorno desconocido. Me siento tranquilo y bien dispuesto. Sólo puede haber una razón de que me encuentre así: que no soy en realidad consciente de la situación".

Con este franco reconocimiento de la posibilidad del desastre se ponía la venda antes de la herida. Si el equipo hubiese declarado que no había nada de que preocuparse, habría sido hora de empezar a inquietarse. Entre 1960 y 2002 los Estados Unidos, Rusia y Japón enviaron 33 misiones al Planeta Rojo y sólo nueve acabaron bien. Para la exploración planetaria, este porcentaje de fallos no es inusual: de las primeras 33 misiones a la Luna, sólo tuvieron éxito catorce. Pero cuesta pechar con los fallos que condenaron al Mars Climate Orbiter en 1999: olvidar la conversión de las unidades imperiales en métricas y no descubrir que ése era el error cuando la nave espacial se iba desviando de su trayectoria. Y sólo una semana antes de que el Spirit llegase a Marte, el módulo de aterrizaje británico Beagle 2 se había zambullido en la atmósfera marciana y nunca más se supo de él.

Los controladores del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA tienen la costumbre de abrir una bolsa de cacahuetes para que les dé buena suerte. Había llegado el momento. A las 20:29 el Spirit comenzó su meteórico descenso. (Para ser exactos, en ese momento llegó la señal de confirmación a la Tierra. A esa hora, el Spirit ya había tomado suelo en Marte: la duda era si lo había hecho de una sola pieza o en muchas.) Al cabo de dos minutos, el módulo de aterrizaje había tenido que resistir el máximo calentamiento atmosférico y la máxima fuerza de deceleración. Pasado otro par de minutos, desplegó su paracaídas y emergió de la cápsula. Aún dos minutos más, y sus cojines de protección ("airbags") se inflaban y los controladores de la misión anunciaban: "Captamos señales de rebotes sobre la superficie de Marte".



## Este todoterreno y su gemelo Opportunity han desafiado felizmente la maldición astronáutica del planeta rojo

George Musser

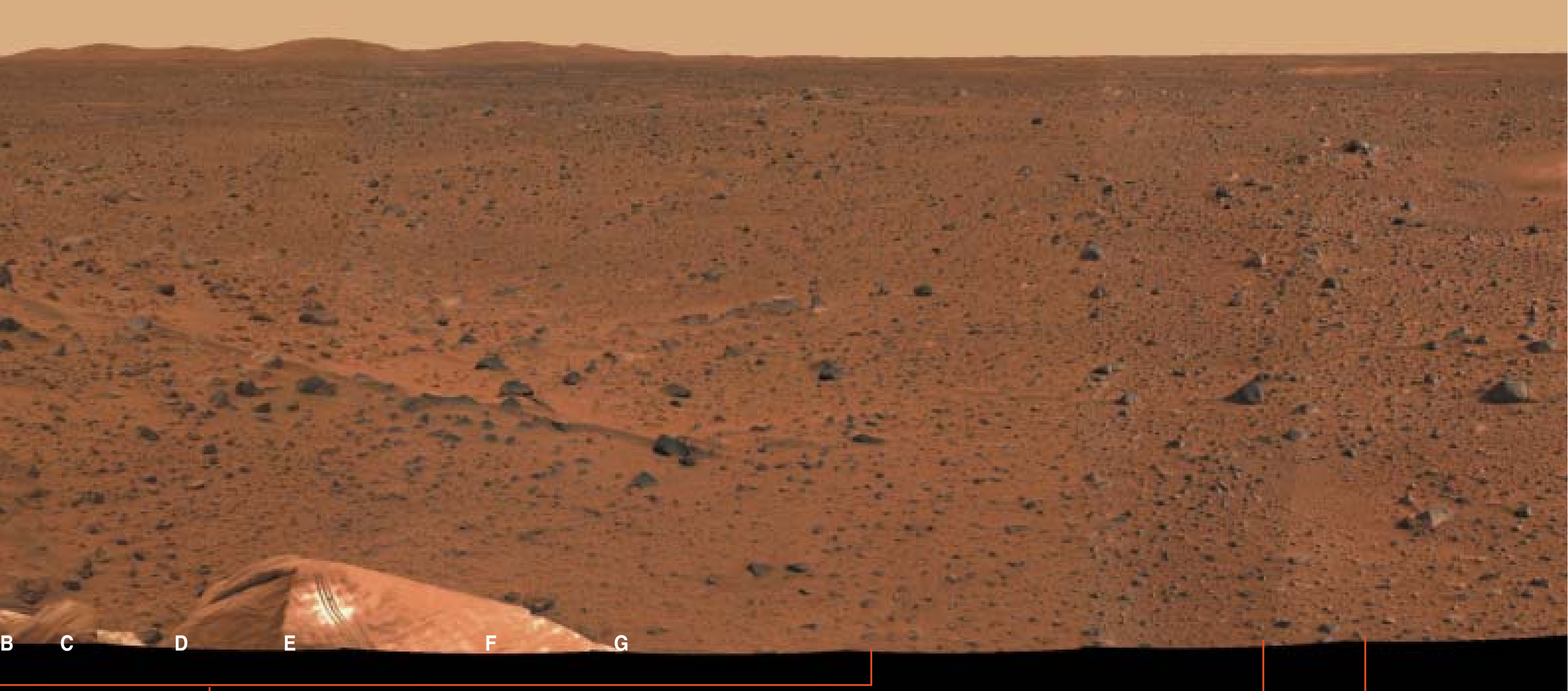
La sala de control fue toda felicitaciones y abrazos. No pasó mucho tiempo, sin embargo, para que se preguntasen si no había sido prematuro tanto alborozo. Se había dejado de recibir la señal de radio. Los ingenieros habían advertido de que el Spirit podría permanecer en silencio durante unos diez minutos, hasta que dejase de rodar. Un módulo de aterrizaje dando tumbos no es una buena plataforma de transmisiones. Pero llegó el décimo minuto y transcurrió sin ningún contacto, y después el undécimo, y el duodécimo. La fina y nerviosa línea de una señal estática de radio surcaba la parte inferior de las pantallas de los controladores. Pero a las 20:52, o 2:51 de la tarde según la hora solar marciana, la línea saltó hacia arriba: el Spirit anunciaba su llegada sin incidentes al Planeta Rojo.

### La Odisea de Squyres

Como antiguos marineros que doblasen el cabo de Hornos, científicos e ingenieros se ponen por propia voluntad en las caprichosas manos del destino por una razón: porque quieren saber si la vida de nuestro planeta es un fenómeno único o un ejemplo más de un proceso universal. Steve Squyres, investigador a cargo de los instrumentos científicos del todoterreno, lleva 17 años intentando llegar a Marte. Este catedrático de la Universidad de Cornell tiene cierta reputación de niño prodigio. Realizó su doctorado de principio a fin en tres años y durante la década de 1980 se convirtió en experto en la mitad de los cuerpos sólidos del sistema solar, de los satélites helados de Júpiter a las llanuras volcánicas de Venus, pasando por las tierras altas de Marte hendidas por el agua. Pero llegó a un punto en que sintió que algo le faltaba a su carrera.

"En nuestro trabajo, se avanza de verdad gracias a quienes construyen instrumentos, los ponen en una nave espacial y los envían a los planetas", declara. "Trabajé en la Voyager; trabajé en la Magallanes. Ni aporté ideas para esas misiones, ni diseñé sus instrumentos, ni los calibré. Simplemente, llegué al final, eché un vistazo a los datos, me fui y escribí un montón de artículos. Una forma muy divertida y satisfactoria de hacer carrera, pero sentí que me estaba aprovechando de los esfuerzos ajenos. Por una sola vez —y va a ser sólo una vez, ésta es una experiencia que no quiero perder ni repetir— deseaba participar en una misión donde al final pudiese decir: contribuí a que sucediera."

En 1987 Squyres formó un equipo, construyó una cámara y la propuso a la NASA para la futura misión Mars Pathfinder. Sus dimensiones eran erróneas y fue descartada. También se integró en uno de los equipos encargados de los instrumentos de la nave Mars Observer. A poco del despegue, en septiembre de 1992, al encenderse el cohete que la haría escapar de la órbita terrestre, se manifestó la volubilidad de los vuelos espaciales. La señal de radio se desvaneció. Squyres creyó que habían perdido la nave, pero cuarenta minutos después se captaba de nuevo




1. PANORAMA ORIENTAL desde el lugar de aterrizaje del Spirit; el norte cae a la izquierda, el sur a la derecha. El primer objetivo del todoterreno fue el cráter Bonneville, situado unos 250 metros al nordeste, dentro del gran cráter Gusev. De paso fue estudiando rocas. Llegó a su borde el 11 de marzo, donde estudió con detalle la piedra Mazatzal, en la que encontró indicios de la acción del agua. El 2 de abril abandonó Bonneville. Desde entonces se dirige, rumbo sur, hacia las colinas orientales, o de Columbia, a unos tres kilómetros largos del punto de aterrizaje. Tienen una altura de unos 100 metros.

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE CORNELL

# LA NUEVA CABEZA DE PUENTE DE LA HUMANIDAD EN MARTE

EL LUGAR DE ATERRIZAJE DEL SPIRIT, el cráter Gusev, es sólo el cuarto lugar de Marte que los seres humanos hemos visto con detalle. El cráter se sitúa en el límite entre las tierras altas del sur y las llanuras del norte. Es uno de la posible media docena de lechos de lagos que se han identificado en el Planeta Rojo. Los lugares de aterrizaje de la fracasada misión Beagle 2 y del Opportunity, el gemelo del Spirit, también pueden haber sido antiguos lagos. El todoterreno de una misión anterior, el Mars Pathfinder, deambuló por la desembocadura de un gran canal de desagüe. Los módulos de aterrizaje de las misiones Viking se posaron en llanuras sin accidentes.

90 ºN
60 ºN
30 ºN
0 º
30 ºS
60 ºS
90 ºS
180 ºO
90 ºO
0 º
90 ºE
180 ºE
VIKING 1 (CHRYSE PLANITIA)
MARS PATHFINDER (ARES VALLIS)
OPPORTUNITY (MERIDIANI PLANUM)
VIKING 2 (UTOPIA PLANITIA)
BEAGLE 2 (ISIDIS PLANITIA)
SPIRIT (CRATER GUSEV)

a
POSIBLE DESAGÜE (BRECHA EN LA PARED)
CRATER GUSEV
POSIBLES RESTOS DE UN DELTA
MA'ADIM VALLIS
20 km
13ºS
14ºS
15ºS
16ºS
17ºS
173ºE
174ºE
175ºE
176ºE
177ºE
178ºE
m
1531
1131
731
331
–69
–469
–869
–1269
–1669
–2069
–2469
–2869

EL CRATER GUSEV está justamente al norte de Ma'adim Vallis, un cañón de 900 kilómetros de longitud. La vista de la región (*a*) muestra su topografía (*colores*) y bandas de imágenes de alta resolución. La alta densidad de cráteres indica un terreno antiguo, quizá con una edad de cuatro mil millones de años. Los mosaicos de imágenes de alta y baja resolución (*b, c*) amplían el lugar de aterrizaje. Las elipses representan la zona de aterrizaje fijada como objetivo (fue cambiando un poco con el tiempo); las líneas amarillas son las líneas de visión desde la posición inicial del vehículo.

b
MARCAS DE REMOLINOS DE POLVO
POSIBLE CRATER DE LAGO
LUGAR DE ATERRIZAJE
5 km




NASA/JPL/MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS; NASA PLANETARY DATA SYSTEM (*imagen superior*)




SECUENCIA DE ATERRIZAJE del vehículo explorador Spirit, siguiendo el esquema que se anticipó en la misión Mars Pathfinder en 1997. El Spirit entró en la atmósfera a 5,4 kilómetros por segundo. El rozamiento sobre el escudo antitérmico redujo su velocidad a 430 metros por segundo, el paracaídas la disminuyó hasta 70 metros por segundo y los cohetes lo detuvieron a siete metros del suelo. (Los cohetes no completaron el descenso porque eso habría exigido unas determinaciones de la distancia sumamente exactas y un ajuste muy fino del control de los cohetes.) Protegido por “almohadillas hinchables”, el Spirit botó 28 veces sobre la superficie; se detuvo a unos 300 metros al sudeste del punto del primer impacto.



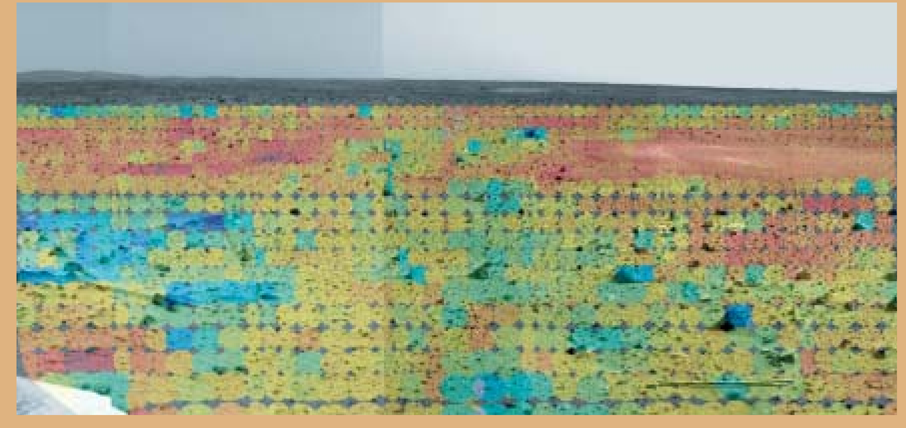
SUPERFICIES DE ROCAS LISAS, que pueden haber sido pulidas por granos de arena transportados por el viento. Esta fue una de las primeras imágenes en color tomadas por el Spirit.




COLINAS ORIENTALES E (*izquierda*) y F (*derecha*) en imágenes tomadas con un intervalo de horas. Se ve cómo afecta el polvo a la visibilidad. La atmósfera es más polvorienta sobre el cráter Gusev de lo que se predecía; en consecuencia, el vehículo explorador está más templado pero dispone de menos energía solar. La colina E se encuentra a 3,1 kilómetros, y la F a 4,2 kilómetros.



LAS SEÑALES DE ARRASTRE, dejadas por las almohadillas hinchables al retraerse, indican un suelo cohesionado; quizá se trate de polvo cargado electrostáticamente o “duricrust” débilmente cementado, como el que observó la misión Viking.



ESTE BARRIDO TERMICO muestra la zona que va del conjunto de colinas orientales hasta la hendidura Sleepy. El polvo está más caliente (*rojo*) porque tiene baja inercia térmica, es decir, se calienta rápidamente al sol. Las rocas, con su mayor inercia térmica, permanecen más frías (*azul*). Otros datos recogidos por el espectrómetro de infrarrojos revelan carbonato de magnesio y minerales hidratados, pero no se sabe aún qué significa en relación con la historia del agua en el cráter Gusev.

ALFRED T. KAMAJIAN; FUENTE: NASA/UNIVERSIDAD DE CORNELL (*arriba*); NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE CORNELL (*centro izquierda y derecha; abajo, izquierda*); NASA/JPL/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA/UNIVERSIDAD DE CORNELL (*abajo, derecha*)

la emisión de la sonda. Al año siguiente, en Marte, desaparecería para siempre.

En 1993 Squyres y su equipo propusieron otro conjunto de instrumentos. De nuevo fueron rechazados. Mientras proyectaban un laboratorio geológico móvil, Atenea, saltó la noticia de que un meteorito encontrado en la Antártida podría contener indicios de vida antigua en Marte. La conmoción revitalizó la exploración de Marte. La misión Pathfinder de 1997 demostró lo que podía hacer un todoterreno robótico; en noviembre de ese año la NASA dio su aprobación a Atenea. Squyres se encontró al frente de un equipo de 170 científicos y 600 ingenieros.

Dos años después, la NASA perdió las misiones Mars Climate Orbiter y Mars Polar Lander. El equipo de Squyres no estaba directamente implicado, pero esos fracasos sacudieron todas las actividades marcianas. Como respuesta a una comisión de investigación, que los atribuyó a que una pobre financiación se hubiese juntado a un exceso de confianza, la agencia aumentó el presupuesto para los todoterrenos. Finalmente costaron 820 millones de dólares. Remozadas y con una nueva orientación, las misiones Spirit y su gemela, la Opportunity, despegaron a fines del pasado verano. Para sobreponerse a tanto desastre, comenta Squyres, hay que ser optimista por naturaleza. "Y pesimista por naturaleza para no quedar desprevenidos ante cualquier eventualidad."

## Un planeta liofilizado

Mientras se concebían y montaban los dos todoterrenos que explorarían Marte, la ciencia marciana pasaba por un momento de agitación. Las misiones Mariner y Viking de los años sesenta y setenta nos mostraron un mundo sin vida, frío y seco, pero esculpido con las huellas de un antiguo vigor: sutiles redes de valles de un pasado remoto y grandes canales de riadas menos lejanas. Se esperaba que los nuevos satélites encontrasen minerales asociados con el agua líquida: carbonatos, arcillas, sales.

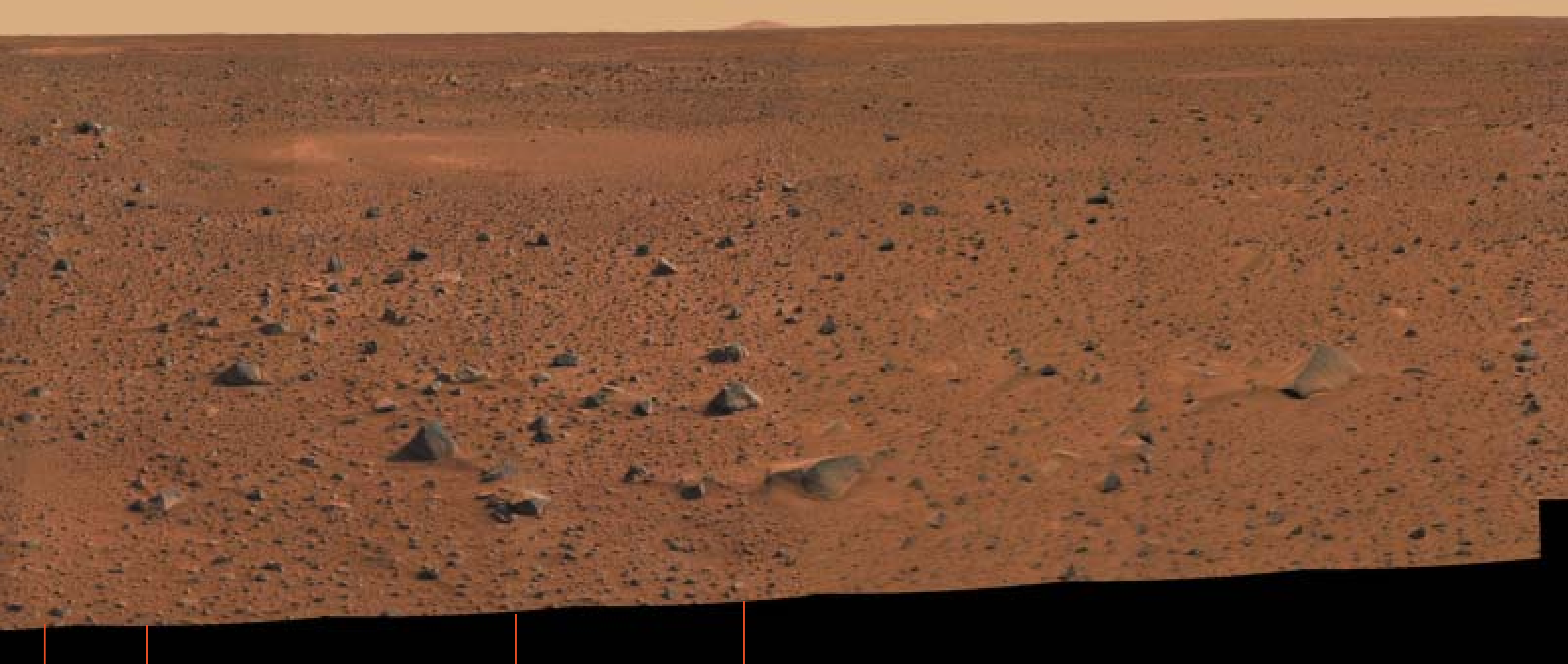
Durante los últimos seis años largos, las sondas orbitales Mars Global Surveyor y Mars Odissey —con instrumentos idénticos a los de la fracasada Mars Observer— han buscado, pero no encontrado, esos minerales. Sí dieron con estratos de olivino, mineral que el agua líquida debería haber degradado. No obstante, también han visto barrancos recientes, viejos litorales y lechos de lagos, y un mineral de óxido de hierro, la hematites gris (no debe confundirse con la roja, o herrumbre), que por lo normal se forma en agua líquida. El planeta contiene extensos depósitos de hielo y presenta marcas de una reciente actividad geológica y glacial. El desconcierto es mayor que nunca.

Según Matt Golombek, el geólogo planetario del Laboratorio de Propulsión a Chorro que dirigió el equipo científico de la misión Pathfinder, ahora miembro del equipo investigador de los todoterrenos de Marte, el debate acerca de las diferencias entre el entorno marciano primigenio y el terrestre es muy vivo. Con Spirit y Opportunity se intenta por primera vez verificar en la misma superficie marciana cómo fue realmente aquel medio ambiente.

Los planificadores de la misión Viking, en su afán de evitar todo riesgo, enviaron sus dos módulos de aterrizaje a los sitios más anodinos de Marte. La misión Pathfinder, aunque más atrevida, no fue más que un vuelo de pruebas. Aparte del deseo general de estudiar tantas rocas diferentes como fuese posible, el equipo de Golombek no se preocupó demasiado por dónde aterrizaba. Las misiones Spirit y Opportunity son las primeras que se han posado en lugares que los científicos realmente querían visitar

En una vista orbital, el nuevo hogar del Spirit, el cráter Gusev, parece un lecho de lago. Tiene una fina estratificación, depósitos con forma de delta y terrazas sinuosas; se encuentra en el extremo septentrional de Ma'adim Vallis, uno de los mayores valles del planeta. El Opportunity va en busca de hematites gris, que se concentra en Meridiani Planum. Phil Christensen, geólogo planetario de la

2. PANORAMA OCCIDENTAL; el sur cae a la izquierda, el norte a la derecha. La zona de color más claro es la hendidura de Sleepy, una depresión poco profunda y de un diámetro de alrededor de nueve metros, situada a unos doce metros. Las marcas oscuras en la superficie polvorienta de la depresión pueden ser lugares donde botó el vehículo explorador antes de detenerse. Adirondak sería la primera piedra marciana cepillada (el 5 de febrero) y en que se abrió un agujero (el 7).



Universidad estatal de Arizona, estudió hace poco la topografía de los afloramientos de hematites y concluyó que el mineral forma un estrato fino y plano, como si Meridiani, al igual que Gusev, hubiese sido el lecho de un lago.

Estas hipótesis sólo se pueden corroborar en la superficie. Como el viento no puede transportar granos de arena mayores de medio centímetro, el descubrimiento de granos mayores implicaría la existencia de otro agente de erosión, probablemente el agua. Cuando la hematites se cristaliza en el agua de un lago (y no, por ejemplo, en un manantial caliente), participa a menudo en la reacción química el mineral goethita. Los espectrómetros de los vehículos exploradores pueden buscarlo. Pieza a pieza, dato a dato, los todoterrenos deberían ir explicando que Marte sea a la vez tan ajeno a la Tierra y tan parecido a ella.

## Marte visto por los terrícolas

Unas tres horas después de que el Spirit aterrizase, el 3 de enero a las 23:30, empezaban a fluir los datos, remitidos a través de la sonda orbital Odissey. La súbita aparición de las primeras imágenes impresionó a los habituados a misiones anteriores, cuando las imágenes se iban formando lentamente línea a línea, como una cortina que se levantase ante otro mundo. El cráter Gusev irrumpió en la sala de control.

Las cámaras principales van instaladas sobre un mástil de 1,5 metros de altura; la vista viene a ser la que se tendría estando de pie en el planeta. Pero se tarda algo en acostumbrarse. Jim Bell, científico de Cornell que ha estado trabajando en la cámara panorámica de color Pancam desde 1994, comenta que en los ensayos comprendió que un lugar se experimenta de manera muy distinta cuando se lo ve con los ojos del todoterreno que cuando se lo conoce en persona. La sensación de profundidad es muy distinta, porque en el primer caso se mira una proyección plana del mundo y no hay nada que sirva de referencia. No hay árboles, no hay casas; faltan las pistas que nos rodean e indican la distancia a que están las cosas.

A pesar de todo, las primeras imágenes sobrecogían, de familiares que parecían, con sus rocas, depresiones, colinas y mesetas. Pero la investigación espacial es como deshojar los pétalos de una margarita. A primera hora de la mañana del 21 de enero, se preparaba al Spirit para que analizara su primera roca. Adirondack la llamaron, como las montañas del estado de Nueva York. Le ordenaron que probara una parte del espectrómetro de infrarrojos. Envió la señal de que había recibido la orden. Pero seguidamente enmudeció. Durante dos días, los controladores intentaron comunicar con él casi una docena de veces. Por fin restablecieron contacto. Aunque no corría inminente peligro, el Spirit se había reinicializado por sí mismo más de 60 veces. El problema estribaba en la saturación de la memoria flash durante la travesía desde la Tierra y en una degradación del sistema de ficheros. El 29 de enero Spirit volvía a transmitir imágenes. Para los primeros días de febrero, había recuperado su funcionamiento normal.

En los días transcurridos desde entonces, Spirit y Opportunity han recorrido cientos de metros, analizado varias rocas y generado decenas de gigabytes de datos. Spirit analizó en la segunda mitad de marzo una roca del borde del cráter Bonneville a la que parece que erosionó el viento. La han denominado Mazatzal, como unas montañas de Arizona. La presencia de múltiples recubrimientos y de fracturas interiores rellenas de material transformado parecen indicios de que la atravesó agua.

A principios de marzo, que Opportunity hubiese hallado en un afloramiento rocoso pequeñas bolas pulidas, o "arándanos", y abundancia de azufre y jarosita se interpretó como posible prueba de que aguas quizá subterráneas empaparon la piedra (ése sería también el caso de Mazatzal). Pero la existencia de estratos que no son paralelos entre sí señaló enseguida que debió de estar sumergida en algún fluido. Para determinar si se trataba de agua, no bastaba la resolución de la cámara Pancam; se recurrió a otro instrumento, el Creador de Imágenes Microscópicas. Como sólo abarca un campo de tres centímetros, se construyó un mosaico de 152 imágenes de la roca "Ultima Oportunidad", pese a que no estaba previsto utilizar así el aparato. Ante lo que se ha descubierto de esta manera, y como además hay cloro y bromo, Squyres anunciaba el 23 de marzo que Opportunity estaba explorando el litoral de un viejo mar salado. No podría, sin embargo, encontrar fósiles de formas de vidas microscópicas; carece de resolución suficiente.

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE CORNELL

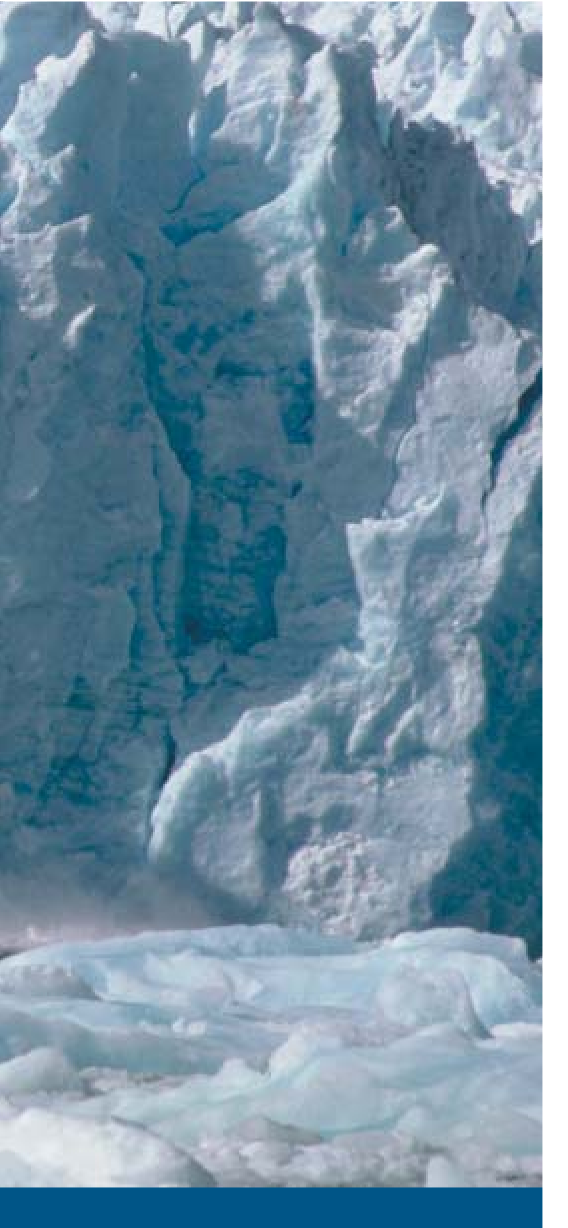




# El calentamiento global

El calentamiento global es real. Las consecuencias podrían ser desastrosas. No obstante, ciertas actuaciones prácticas, que de paso nos proporcionarían una atmósfera más limpia y sana, podrían retardar y, con el tiempo, detener el proceso

James Hansen



1. UN ICEBERG SE DESPRENDE del glaciar de San Rafael, en Chile. La desintegración de las masas de hielo del mundo entero elevaría el nivel del mar varios metros. Las desastrosas consecuencias de esa elevación establecen una baja cota máxima al calentamiento que puede experimentar el planeta sin repercutir gravemente en la sociedad.

Mi esposa, mi hijo y yo fuimos a la playa a mediodía. Encontramos un hueco cerca del agua para evitar la abrasadora arena. Cuando el sol se ponía, un fuerte viento del océano llenó el mar de cabrillas. Mi hijo y yo teníamos la carne de gallina mientras corríamos a lo largo de la espumosa orilla y contemplábamos las crestas blancas de las olas.

Aquel mismo verano de 1976, Andy Lacis y yo, junto con otros compañeros del Centro Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, habíamos evaluado los efectos de los gases de invernadero sobre el clima. Ya se sabía entonces que se estaban acumulando en la atmósfera gases de invernadero antropogénicos, especialmente el dióxido de carbono y los halocarburos. Estos gases constituyen una "violencia" climática, una perturbación, exógena al sistema, que afecta al equilibrio energético del planeta y, por lo tanto, al clima. A la manera de una manta, los gases de invernadero absorben la radiación infrarroja (calor) que de otra manera escaparía de la superficie terrestre y la atmósfera al espacio.

Nuestro grupo había calculado que esos gases originados de la actividad humana estaban calentando la superficie terrestre a razón de casi dos watt por metro cuadrado. Una bombilla pequeña de un árbol de Navidad disipa alrededor de un watt, principalmente en forma de calor. Era, pues, como si los seres humanos hubiésemos colocado dos de esas bombillas, encendidas día y noche, en cada metro cuadrado de la superficie terrestre.

En aquella playa, se me hizo manifiesta la paradoja implícita en la noción de calentamiento global: el contraste entre las asombrosas fuerzas de la naturaleza y la insignificancia de las bombillitas. Ciertamente, su débil calefacción no podía regir los vientos y olas, ni quitarnos la carne de gallina. Incluso el imperceptible calor que desprendían en la superficie oceánica se disipaba enseguida hacia las grandes profundidades, de modo que harían falta muchos años, quizá siglos, para que se calentase de verdad la superficie.

Esa paradoja en la idea del calentamiento global se ha despejado en buena medida gracias al estudio de la historia del clima terrestre, que ha revelado que fuerzas pequeñas, si actúan durante un tiempo suficiente, llegan a producir grandes cambios climáticos. Y, según los anales, la Tierra ha comenzado a calentarse en recientes decenios a la velocidad predicha por los modelos climáticos que tienen en cuenta la acumulación atmosférica de los gases de invernadero antropogénicos. Ya se perciben efectos del calentamiento: los glaciares están retrocediendo en todo el mundo, los hielos árticos pierden espesor y la primavera llega alrededor de una semana antes que hace 50 años.

Sin embargo, hay muchos puntos que quedan pendientes. ¿Cuánto cambiará el clima en los próximos decenios? ¿Cuáles serán las consecuencias prácticas? ¿Qué deberíamos hacer al respecto, si es que se ha de hacer algo? Es un debate vidrioso; arrastra consigo demasiadas repercusiones económicas.

El análisis objetivo del calentamiento global requiere un conocimiento cuantitativo de tres cuestiones: la sensibilidad del sistema climático a las perturbaciones inducidas, la magnitud de las agresiones provocadas por la actividad humana y el tiempo que el clima tarda en reaccionar ante tales perturbaciones. Todos esos puntos se pueden estudiar con modelos climáticos globales, simulaciones numéricas realizadas en ordenadores. Pero nuestro conocimiento más preciso sobre la sensibilidad climática, al menos hasta ahora, se basa en datos empíricos relativos a la historia de la Tierra.

## Las lecciones de la historia

A lo largo de los últimos millones de años, el clima terrestre ha oscilado repetidamente entre edades del hielo y períodos interglaciales cálidos. Se ha conservado un archivo de temperaturas de 400.000 años de antigüedad en la capa de hielo antártica. Excepto en los bordes costeros, la capa se libró de la fusión incluso en los más cálidos períodos interglaciales. Este archivo (*véase el recuadro* "400.000 años de cambio climático") su-



giere que el presente período interglacial (el Holoceno), que empezó hace unos 12.000 años de antigüedad, está ya agotándose.

Las naturales oscilaciones climáticas milenarias van asociadas a variaciones lentas de la órbita terrestre inducidas por los campos gravitatorios de otros planetas, sobre todo Júpiter y Saturno (porque son muy grandes) y Venus (porque se nos acerca mucho). Estas perturbaciones apenas cambian la energía solar media anual que llega a la Tierra, pero alteran la distribución geográfica y estacional de la energía solar incidente, o insolación, hasta en un 20 por ciento. Los cambios en la insolación durante largos períodos, afectan a la formación y fusión de las capas de hielo.

La insolación y los cambios climáticos afectan también a la absorción y emisión de dióxido de carbono y metano por las plantas, los suelos y el océano. Aún no es completo el conocimiento cuantitativo de cómo el océano y los suelos liberan dióxido de carbono y metano cuando la Tierra se calienta, pero los datos paleoclimáticos ofrecen ya un tesoro de información. Las oscilaciones del clima de la Edad de Hielo nos aportan algo fundamental: una medida empírica de la sensibilidad climática.

La composición de la atmósfera de la Edad de Hielo se conoce con precisión gracias a las burbujas de aire aprisionadas a medida que las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia, como numerosos glaciares de montaña, iban creciendo gracias a las nevadas de cada año. Además, la distribución geográfica de las capas de hielo, la cubierta vegetal y el perfil de las costas durante la Edad de Hielo están bien cartografiadas. A partir de esos datos, sabemos que la magnitud de la perturbación exógena total ha cambiado entre la Edad de Hielo y la actualidad en unos 6,5 watt por metro cuadrado. Esta diferencia sustenta un cambio global de temperatura de 5 grados Celsius, es decir, una sensibilidad climática de $0,75 \pm 0,25$ grados Celsius por watt y metro cuadrado. Aunque los modelos climáticos predicen una sensibilidad climática similar, el resultado empírico es más preciso y fidedigno porque abarca todos los procesos que operan en el mundo real, incluidos los que todavía no hemos sabido incorporar en los modelos.

Los paleodatos nos enseñan algo más: los cambios de la órbita terrestre provocan cambios climáticos, al alterar las propiedades de la atmósfera y la superficie, y, por lo tanto, el equilibrio de energía planetario. Hoy en día, las actividades humanas afectan más a las propiedades de la atmósfera y la superficie que las variaciones orbitales de nuestro planeta.

## Perturbaciones exógenas

El mayor cambio operado por las perturbaciones exógenas del clima en los siglos recientes es el debido a los gases de invernadero antropogénicos. Los gases de invernadero presentes en la atmósfera absorben la radiación calorífica, en vez de dejarla escapar al espacio. La atmósfera devuelve más calor al suelo del que permite salir al espacio; la Tierra radia así menos energía al espacio que la que absorbe del Sol. Este desequilibrio temporal de la energía planetaria da por resultado un calentamiento gradual de la Tierra.

El más importante gas antropogénico de invernadero es el dióxido de carbono; procede sobre todo de la combustión de carburantes fósiles (carbón, petróleo y gas). No obstante, el efecto combinado de otros gases antropogénicos es comparable. Esos otros gases, especialmente el ozono troposférico y sus precursores, como el metano, son ingredientes de la niebla fotoquímica, perjudicial para la salud humana y la productividad agrícola.

Los aerosoles (partículas finas en el aire) constituyen el otro principal factor humano de alteración del clima. Su efecto es más complicado. Algunos aerosoles "blancos", como los sulfatos que proceden del azufre en los carburantes fósiles, son muy reflectores y reducen, por tanto, el calentamiento solar de la Tierra; sin embargo, el hollín, producto de la combustión incompleta de los carburantes fósiles y los biocarburantes, así como de la quema de biomasa al aire libre, absorbe la luz solar y, por lo tanto, calienta la atmósfera. La magnitud de esta perturbación exógena directa del clima provocada por los aerosoles es incierta en al menos un 50 por ciento, en parte porque las cantidades de aerosol no son bien conocidas y en parte a causa de la complejidad del fenómeno.

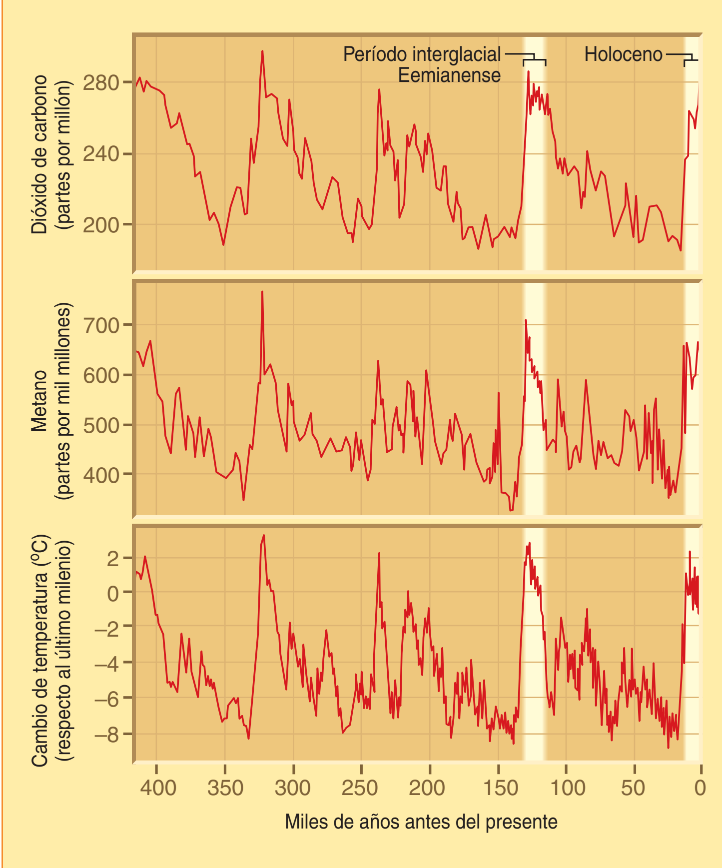
Los aerosoles producen también una perturbación indirecta al alterar las propiedades de las nubes. Las nubes resultantes, más brillantes y de vida más larga, reducen la cantidad de luz solar absorbida por la Tierra: el efecto indirecto del aerosol consiste en una perturbación negativa que causa enfriamiento.

Otro factor antropogénico que influye sobre el clima es la sustitución de bosques por campos de cultivo. Los bosques son oscuros, incluso con el suelo cubierto de nieve; su eliminación reduce el calentamiento solar.

## Resumen/Calentamiento global

- En la actualidad, nuestros más precisos conocimientos de la sensibilidad climática se basan en lo que sabemos de la historia de la Tierra, que nos ha enseñado que pequeñas fuerzas, mantenidas durante suficiente tiempo, producen grandes cambios climáticos.
- El efecto de los factores antropogénicos que afectan al clima, sobre todo los gases de invernadero, el hollín y otras partículas pequeñas, excede ahora al de los factores naturales; el mundo empieza a calentarse a un ritmo predicho por los modelos climáticos.
- La estabilidad de las grandes capas de hielo de Groenlandia y la Antártida y la necesidad de preservar la línea de costa en todo el mundo establecen una cota baja para el grado de calentamiento que constituiría una "interferencia antropogénica peligrosa" en el clima.
- Para detener el calentamiento global se requiere una cooperación internacional urgente y sin precedentes, pero las acciones necesarias son factibles y proporcionan beneficios adicionales a la salud humana, la agricultura y el medio.

## 400.000 AÑOS DE CAMBIO CLIMATICO




LOS HIELOS ANTARTICOS han preservado un archivo de temperaturas y de niveles atmosféricos de dióxido de carbono y metano que abarca 400.000 años. Se analizan los gases aprisionados en las burbujas de aire encerradas en el hielo. Por lo general, se emplean para ello testigos de hielo (*fotografía*) extraídos de la capa de hielo. Se los transporta a un laboratorio. El registro histórico nos proporciona dos mediciones fundamentales: la comparación del actual período interglacial (el Holoceno) con la más reciente Edad de Hielo (hace 20.000 años) proporciona una medida precisa de la sensibilidad del clima a las perturbaciones exógenas. La temperatura en el anterior período interglacial (el Eemianense), durante el cual el nivel del mar era varios metros más alto que el actual, define un grado de calentamiento que la civilización actual consideraría una interferencia antropogénica peligrosa en el clima.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: J. R. PETIT ET AL. EN *NATURE*, VOL. 399, PAGS. 429–436; 3 DE JUNIO, 1999 (*gráficos*); CSIRO/SIMON FRASER *Photo Researchers, Inc.* (*fotografía*)

No parece probable que otras agresiones naturales, como las debidas a las erupciones volcánicas y las fluctuaciones del brillo solar, presenten una tendencia concreta en una escala de tiempo del orden de mil años. Pero consta que ha habido un pequeño aumento del brillo solar a lo largo de los últimos 150 años; la perturbación se cifra en décimas de watt por metro cuadrado.

El valor neto de estos efectos, sumados desde 1850, es de 1,6 ± 1,0 watt por metro cuadrado. Pese a las grandes incertidumbres, hay pruebas de la validez aproximada de esta estimación. Una la da la estrecha concordancia de la temperatura global observada durante los últimos decenios con los modelos climáticos que incorporan esas perturbaciones exógenas. Pero hay otra prueba más fundamental: la ganancia de calor en los océanos mundiales durante los últimos 50 años concuerda con la perturbación exógena total neta estimada.

## Calentamiento global

La temperatura global media en superficie ha aumentado unos 0,75 grados desde que se generalizaron las mediciones con instrumentos, es decir, desde finales del siglo XIX. La mayor parte del calentamiento, unos 0,5 grados, ha tenido lugar después de 1950. Las causas del calentamiento observado se pueden investigar mejor en los últimos 50 años, porque la mayor parte de las perturbaciones se observaron entonces, sobre todo desde que se iniciaron en el decenio de 1970 las medidas de la radiación solar, los aerosoles estratosféricos y el ozono mediante satélites. Además, el 70 por ciento del incremento antropogénico de los gases de invernadero se ha producido después de 1950.

La magnitud más importante es el desequilibrio planetario de energía (*véase el recuadro* "Desequilibrio energético de la Tierra"). Se debe al largo tiempo que tardan los océanos en calentarse. Llegamos a la conclusión de que la Tierra está ahora desequilibrada, desde el punto de vista radiativo, entre 0,5 y 1 watt por metro cuadrado: absorbe mucha más radiación de la que emite en forma de calor hacia el espacio. Aun cuando la composición de la atmósfera no cambiara más, la superficie terrestre seguiría calentándose un poco con el tiempo, entre 0,4 y 0,7 grados.

La mayor parte del desequilibrio energético se debe al calor que ha ido a parar a los océanos. Sydney Levitus, de la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera de los EE.UU., ha analizado la variación de temperatura de los océanos en los últimos 50 años y ha hallado que el contenido oceánico mundial de calor aumentó en unos 10 watt-año por metro cuadrado en el último medio siglo. Ha observado también que la velocidad del almacenamiento de calor por los océanos en los últimos años concuerda con nuestro cálculo de que la Tierra está ahora energéticamente

desequilibrada, entre 0,5 y 1 watt por metro cuadrado. Obsérvese que la cantidad de calor necesaria para fundir suficiente hielo como para elevar el nivel del mar en un metro es de alrededor de 12 watt-año (promediada por todo el planeta), energía que se podría acumular en una docena de años si el planeta estuviese desequilibrado en un watt por metro cuadrado.

La concordancia de los modelos con las observaciones, en lo que se refiere al cambio de temperatura y al almacenamiento oceánico de calor, no deja duda de que el cambio climático global observado viene inducido por perturbaciones exógenas, unas naturales y otras antropogénicas. La velocidad actual de almacenamiento de calor por el océano es un parámetro planetario decisivo: no sólo determina la magnitud del calentamiento global adicional ya en puertas, sino que también es igual a la reducción de las agresiones necesarias para estabilizar el clima actual de la Tierra.

## La bomba de tiempo

El Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, firmado en Río de Janeiro en 1989, se propone estabilizar la composición atmosférica para "evitar una peligrosa interferencia antropogénica en el sistema climático" y alcanzar tal objetivo sin poner en riesgo la economía global. Una parte, crucial pero difícil, del problema estriba en definir el nivel de calentamiento que constituye una "peligrosa interferencia antropogénica".

Las Naciones Unidas establecieron un Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) encargado de analizar el calentamiento global. Ha definido diversos supuestos de perturbación exógena; se ha valido de ellos para simular el clima del siglo XXI y ha evaluado el impacto de los cambios en temperaturas y precipitaciones en la agricultura, los ecosistemas o la vida salvaje. Calcula cambios del nivel del mar de hasta varias decenas de centímetros en 199 años, si el calentamiento global llega a ser de varios grados. Se debería, sobre todo, a la dilatación térmica del agua oceánica, con poca variación en el volumen de las capas de hielo.

Lo moderado de estos efectos climáticos, incluso con una acumulación rápida de los gases de invernadero, deja la impresión de que no estamos cerca de una "peligrosa interferencia antropogénica". No obstante, expondré por qué estamos mucho más próximos de lo que generalmente se cree; por ello, habría que insistir en mitigar los cambios, en lugar de simplemente adaptarnos a ellos.

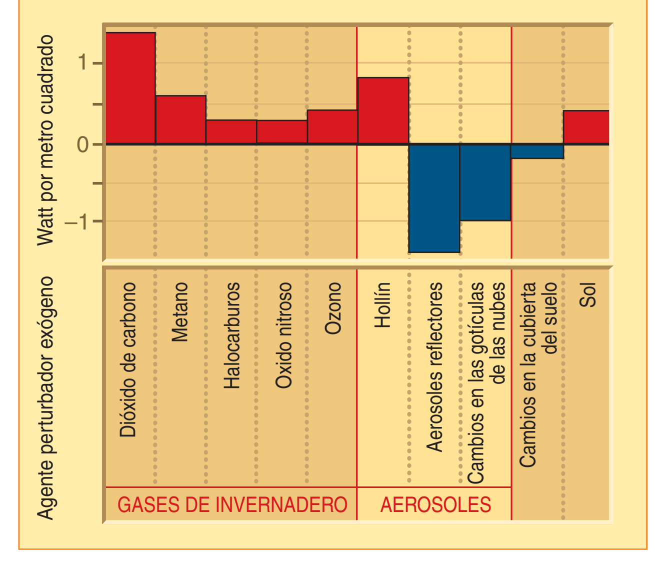
En mi opinión, el mayor problema del calentamiento global es la elevación del nivel del mar y la velocidad a que las capas de hielo se desintegran. Una considerable porción de la humanidad vive a pocos metros del nivel del mar, con billones de euros de infraestructuras. La necesidad de preservar las líneas costeras en todo el mundo establece un bajo techo al nivel de calentamiento global que constituiría una "peligrosa interferencia antropogénica".

La historia de la Tierra y el presente desequilibrio energético de origen antropogénico, tomados juntamente, nos dibujan un cuadro inquietante de las perspectivas del cambio del nivel del mar. Los datos del archivo antártico de temperaturas muestran que el calentamiento de los últimos 50 años ha llevado de nuevo la temperatura global al máximo, más o menos, de este período interglacial en que vivimos (el Holoceno). Hay algún calentamiento adicional en puertas, que nos dejará a medio camino del más alto nivel de temperatura del anterior período interglacial (el Eemianense), más cálido que el Holoceno; su nivel del mar sobrepasaba en cinco o seis metros el actual. Un watt por metro cuadrado de agresión añadida a la existente ahora llevaría la temperatura global al máximo nivel del Eemianense.

La cuestión principal es: ¿con qué rapidez responderán las capas de hielo al calentamiento global? El PICC prevé sólo un ligero cambio en las capas de hielo de aquí a 100 años; pero sus cálculos sólo incluyen el efecto gradual de los cambios en nevadas, evaporaciones y fusiones. En la realidad, la desintegración de las capas de hielo está gobernada por realimentaciones y procesos de claro carácter no lineal. El máximo de la velocidad de deglaciación tras la última Edad del Hielo mantuvo, durante varios siglos, un ritmo de fusión de más de 14.000 kilómetros cúbicos por año —alrededor de un metro de subida del nivel del mar cada 20 años—. Este período de máxima celeridad de la fusión coincidió, dentro de la precisión con

## PERTURBACIONES EXOGENAS

LAS PERTURBACIONES EXOGENAS inducidas sobre el sistema climático alteran el equilibrio de energía de la Tierra. La agresión puede ser natural, por ejemplo las fluctuaciones de la órbita terrestre o los aerosoles —partículas finas— expelidos por un volcán, o antropogénica, como los aerosoles y los gases de invernadero emitidos por las actividades humanas. Las perturbaciones antropogénicas superan ahora a las naturales. El dióxido de carbono causa la agresión mayor, pero el conjunto de los contaminantes atmosféricos (hollín, ozono, metano) ejerce un efecto de magnitud comparable. (Los efectos de los aerosoles no se conocen con precisión.)




JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: JAMES HANSEN



2. LAS PERTURBACIONES CLIMATICAS EXOGENAS debidas a las actividades humanas, sobre todo las causadas por los gases de invernadero, calientan la superficie terrestre a razón de unos dos watt por metro cuadrado: el equivalente a dos bombillitas de un watt encendidas sobre cada metro cuadrado de la superficie del planeta. Los océanos retardan el efecto de ese calentamiento porque absorben gran cantidad de calor. La superficie oceánica empieza a calentarse, pero antes de que haya subido mucho su temperatura, las aguas superficiales se habrán ido hundiendo y mezclando, sustituidas por otras más frías, más profundas. Se calcula que se necesita alrededor de un siglo para que el océano alcance su nueva temperatura.

RANDY HARRIS

que se puede medir, con la época de calentamiento más rápido.

Dada la actual e inusual velocidad del calentamiento global en un planeta ya caliente, podemos anticipar que las zonas de fusión estival y de lluvia se extenderán a grandes zonas de Groenlandia y los bordes de la Antártida. El propio ascenso del nivel del mar tiende a elevar las capas de hielo marinas que hacen de contrafuerte para los hielos terrestres, que se desprenden entonces de sus puntos de anclaje. A medida que las capas de hielo marinas se rompen, se acelera el movimiento de los hielos terrestres hacia el océano. La formación de los glaciares es lenta, pero una vez que una capa de hielo comienza a desplomarse, su desaparición puede ser rapidísima.

El desequilibrio energético planetario inducido por el hombre proporciona una amplia reserva de energía para fundir los hielos. A ella se añaden la creciente absorción de radiación solar por las capas de hielo, a las que oscurecen los aerosoles carbonados negros, y el proceso de realimentación positiva conforme el agua fundida oscurece la superficie de los hielos.

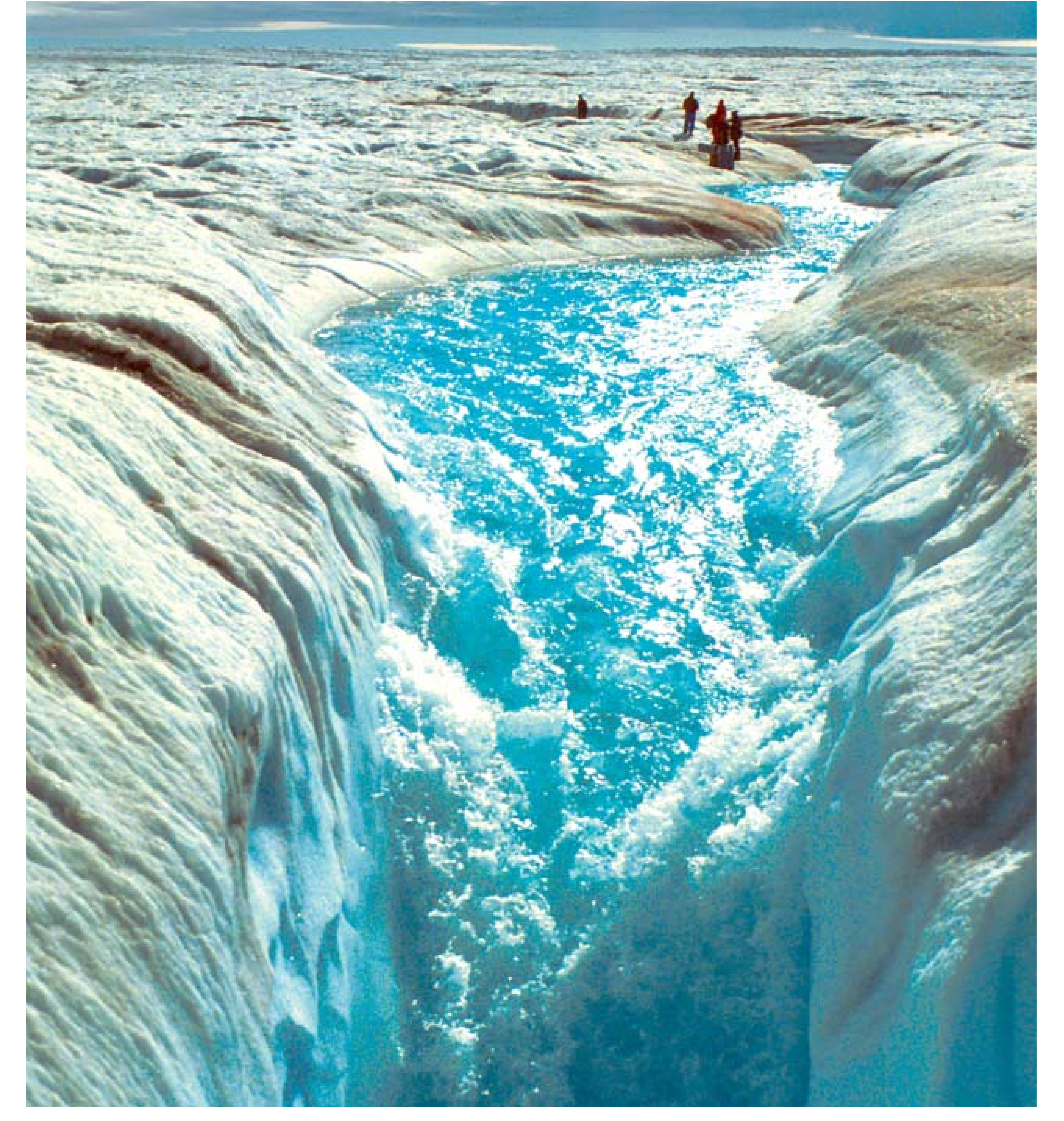
Estas consideraciones no significan que debamos esperar grandes cambios del nivel del mar de aquí a unos pocos años. El acondicionamiento previo de las capas de hielo para su destrucción acelerada puede requerir largo tiempo, quizá muchos siglos. (El satélite ICESat, recientemente lanzado por la NASA, tal vez pudiese detectar los primeros indicios de rotura acelerada de las capas de hielo.) Pese a ello, sospecho que empezaría mucho antes un apreciable ascenso del nivel del mar, si el desequilibrio energético planetario continúa aumentando. Parece claro que el calentamiento global, más allá de cierto límite, haría inevitable para las generaciones futuras un cambio notable del nivel del mar. Y una vez que la destrucción de las capas de hielo haya comenzado en gran escala, no habría manera práctica de detenerla. Los diques podrían proteger regiones limitadas, como Manhattan u Holanda, pero la mayoría de las costas del globo se inundarían.

Sostengo que el nivel de interferencia antropogénica peligrosa se alcanza cuando la temperatura global y el desequilibrio radiativo planetario impiden que se pueda evitar una deglaciación sustancial. Basándome en los indicios paleoclimáticos, sugiero que el máximo nivel prudencial de calentamiento del planeta viene a ser de un grado. Esto significa que la perturbación exógena adicional no debería exceder, aproximadamente, un watt por metro cuadrado.

## Cuadros posibles de agresiones exógenas

El PICC define muchos cuadros posibles de agresiones exógenas para el siglo XXI, basados en diferentes prospectivas de la población, el desarrollo económico y las fuentes de energía. Estima que, en los próximos 50 años, se añadirán de uno a tres watt por metro cuadrado a causa del dióxido de carbono (de dos a cuatro si se incluyen los demás gases y los aerosoles). De acuerdo con nuestro criterio, los propios valores mínimos calculados por el PICC provocarían una peligrosa interferencia antropogénica en el sistema climático.

Claro que los cuadros supuestos por el PICC pueden ser indebidamente pesimistas. En primer lugar, ignoran los cambios en las emisiones, algunos de ellos ya en marcha, promovidos precisamente por la inquietud que causa el calentamiento global. En segundo lugar, dan por sentado que la contaminación atmosférica propiamente dicha continuará empeorando,



3. UNA CORRIENTE DE AGUA procedente de la fusión de nieve se precipita por una grieta abierta en la capa de hielo de Groenlandia. La foto se tomó en un verano reciente. La grieta, una hendidura casi vertical excavada en el hielo por las aguas superficiales, lleva el agua a la base de la capa. Allí, el agua actúa de fluido lubricante que acelera el movimiento y la desintegración de la capa de hielo. El crecimiento de ésta es un proceso lento y seco, limitado por la cuantía de las nevadas. La desintegración, en cambio, es un proceso húmedo, impulsado por realimentaciones positivas; una vez iniciado, puede llegar a adquirir una rapidez explosiva.



que el ozono, el metano y el hollín abundarán más en 2050 que en 2000. En tercer lugar, silencian los avances técnicos que podrían reducir las emisiones en los próximos 50 años.

Una manera diferente de pergeñar tales cuadros consiste en examinar las actuales tendencias de los factores de agresión exógena, preguntarse por las razones de que vayan cambiando y tratar de ver cómo cabría alentar un mayor frenado del ritmo a que crecen.

La velocidad de crecimiento de la perturbación exógena inducida por los gases de invernadero alcanzó un máximo a principios del decenio de 1980, con casi 0,5 watt por metro cuadrado por decenio, pero ha disminuido en el decenio de 1990 hasta unos 0,3 watt por metro cuadrado por decenio. La principal razón de tal descenso ha sido la reducción de emisiones de los halocarburos; se va dejando de producirlos a causa de su efecto destructor sobre el ozono estratosférico.

Los dos gases de invernadero más importantes, con los halocarburos en declive, son el dióxido de carbono y el metano. La velocidad de crecimiento del dióxido

de carbono aumentó bruscamente tras la Segunda Guerra Mundial, se estabilizó desde mediados del decenio de 1970 hasta mediados del decenio de 1990, y subió moderadamente hasta adquirir su valor actual: unas dos partes por millón por año. La velocidad de crecimiento del metano ha disminuido en los últimos 20 años en al menos dos tercios.

Estas velocidades de crecimiento guardan relación con el ritmo mundial de consumo de carburantes fósiles. Las emisiones de carburantes fósiles aumentaron en más de un 4 por ciento por año desde el final de la Guerra Mundial hasta 1975, pero después en sólo alrededor de un 1 por ciento por año. La variación de la velocidad de crecimiento de los carburantes fósiles se produjo después del embargo del petróleo y el aumento de precios del decenio de 1970, con el subsiguiente empeño en mejorar el rendimiento energético. Han influido también en el crecimiento del metano otros factores; entre ellos, los cambios habidos en el cultivo del arroz y un esfuerzo mayor por absorber el metano de vertederos y explotaciones mineras.

Si las recientes velocidades de crecimiento de esos gases de invernadero se mantuviesen, se añadiría una agresión de unos 1,5 watt por metro cuadrado. A ello debe sumarse el cambio causado por otras perturbaciones exógenas, como las causadas por el ozono atmosférico y los aerosoles. No hay buenos seguimientos de sus efectos a lo largo del mundo, pero se sabe que están aumentando en algunos países y disminuyendo en otros. El efecto neto debe de ser pequeño, pero podría añadir hasta 0,5 watt por metro cuadrado. En consecuencia, si no se reducen las velocidades de emisión, la agresión antropogénica sobre el clima podría aumentar en dos watt por metro cuadrado en los próximos 50 años.

Esta velocidad de crecimiento de las perturbaciones exógenas, basada en las tendencias actuales, cae en el extremo bajo del intervalo del PICC, que es de dos a cuatro watt por metro cuadrado. El cuadro supuesto del PICC de cuatro watt por metro cuadrado requiere un crecimiento exponencial de las emisiones de dióxido de carbono del 4 por ciento anual, mantenido durante 50 años, y un gran crecimiento de la contaminación atmosférica; no resulta verosímil.

No obstante, la previsión basada en las tendencias actuales supera el watt por metro cuadrado que yo sugería como mejor evaluación del nivel donde se llega a una interferencia antropogénica peligrosa. Esto suscita la pregunta de si existe un supuesto verosímil donde el nivel de agresión sea menor.

## Un futuro más esperanzador

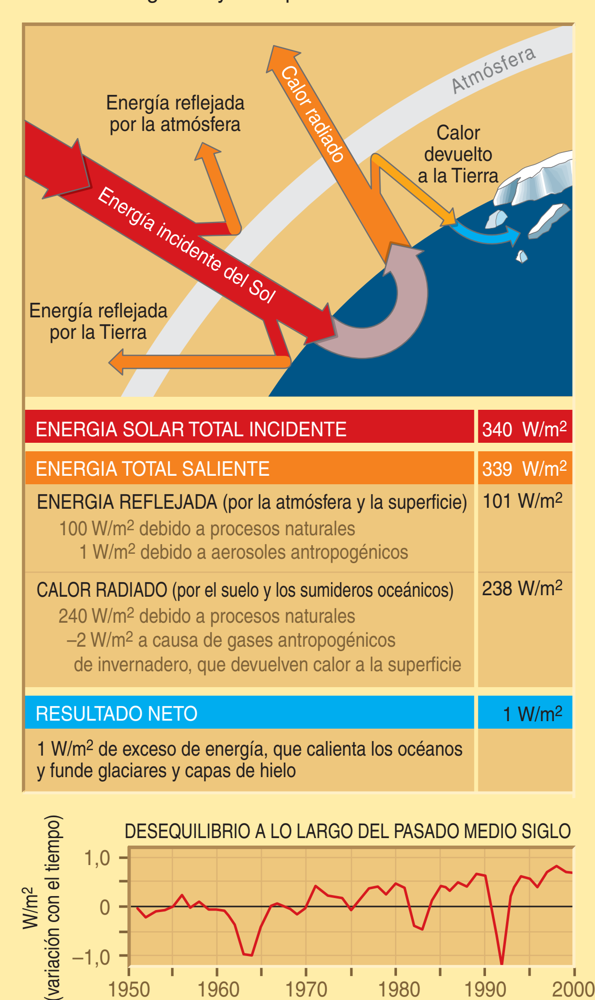
He desarrollado otro cuadro hipotético que establece la perturbación exógena adicional para los próximos 50 años en aproximadamente un watt por metro cuadrado. Depende de que se acometan dos actuaciones: que se detenga o mantenga el crecimiento de los contaminantes atmosféricos, en concreto el hollín, el ozono atmosférico y el metano; y que se mantenga la emisión de dióxido de carbono procedente de los combustibles fósiles en los próximos 50 años más o menos al mismo nivel que ahora. Ambas son igualmente importantes y, en mi opinión, factibles. Además, protegerían nuestra salud y aumentarían la productividad agrícola.

Al abordar la contaminación atmosférica, deberíamos atender a los componentes que más contribuyen al calentamiento global. El metano ofrece una gran opor-

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: JAMES HANSEN

## DESEQUILIBRIO ENERGETICO DE LA TIERRA

La energía de la Tierra está en equilibrio cuando el calor que emite es igual a la energía que recibe del Sol. En la actualidad, el balance de energía se ha desequilibrado (*diagramas y tabla*). Los aerosoles antropogénicos hacen que la Tierra refleje más energía solar, pero esta reflexión queda compensada de sobra por el calor radiante que los gases de invernadero aprisionan. La energía excedente —aproximadamente un watt por metro cuadrado— calienta el océano y funde los hielos. Las mediciones del calor almacenado en los océanos confirman el desequilibrio planetario de energía que aparece en las simulaciones (*gráfico*). El desequilibrio planetario de energía es una medida fundamental: determina la perturbación exógena neta y anticipa el calentamiento global ya en puertas.




| | |
|---|---|
| ENERGIA SOLAR TOTAL INCIDENTE | 340 W/m² |
| ENERGIA TOTAL SALIENTE | 339 W/m² |
| ENERGIA REFLEJADA (por la atmósfera y la superficie)<br>100 W/m² debido a procesos naturales<br>1 W/m² debido a aerosoles antropogénicos | 101 W/m² |
| CALOR RADIADO (por el suelo y los sumideros oceánicos)<br>240 W/m² debido a procesos naturales<br>–2 W/m² a causa de gases antropogénicos de invernadero, que devuelven calor a la superficie | 238 W/m² |
| RESULTADO NETO | 1 W/m² |
| 1 W/m² de exceso de energía, que calienta los océanos y funde glaciares y capas de hielo | |

tunidad. Si se redujesen las fuentes humanas de metano, hasta cabría dentro de lo posible que la cantidad de metano atmosférico disminuyese, proporcionando así un enfriamiento que compensaría parcialmente el aumento debido al dióxido de carbono. La reducción de los aerosoles de hollín ayudaría a contrarrestar el calentamiento originado por las reducciones de sulfatos atmosféricos. Los precursores del ozono atmosférico, aparte del metano, especialmente los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, deben reducirse para que disminuya hasta un nivel bajo la cantidad de ozono atmosférico, componente principal de la niebla fotoquímica.

Las acciones requeridas para reducir la cantidad de metano, como su absorción en los vertederos y en las instalaciones de gestión de residuos, así como durante la extracción de carburantes fósiles, producen beneficios económicos que parcialmente compensan los costes. En algunos casos, el valor del metano como combustible compensa enteramente el coste de su absorción. La reducción de la cantidad de hollín produciría también beneficios económicos, tanto por la disminución de pérdidas de vidas y años de trabajo (las minúsculas partículas de hollín transportan compuestos orgánicos y metales tóxicos hasta los pulmones), como por el aumento de la productividad agrícola en algunas partes del mundo. Las fuentes principales del hollín son los combustibles diesel y los biocombustibles (la madera y el estiércol, por ejemplo). Hay que actuar sobre estas fuentes por razones sanitarias, para empezar. Los carburantes diesel se podrían quemar más limpiamente con técnicas mejoradas; sin embargo, puede incluso haber mejores soluciones, como el uso de hidrógeno como combustible, que eliminaría los precursores del ozono y el hollín.

La mejora del rendimiento energético y el creciente uso de energías renovables podrían nivelar las emisiones de dióxido de carbono a corto plazo. La disminución a largo plazo es un problema más serio, ya que cada vez se consumirá más energía. Ahí, se necesitan progresos de todo género: una mejora continua del rendimiento, más energía renovable y nuevas técnicas que produzcan poco o ningún dióxido de carbono o que lo confinen y almacenen. La próxima

## REDUCCION DE LAS EMISIONES

LAS CANTIDADES OBSERVADAS de dióxido de carbono y metano (*los dos gráficos de arriba*) caen por debajo de las estimas del PICC, que una y otra vez han resultado demasiado pesimistas. Aunque el modelo alternativo del autor concuerda mejor con las observaciones, seguir en adelante por ese camino requeriría una reducción gradual de las emisiones de dióxido de carbono y metano. Gracias a las mejoras en el rendimiento energético (*gráfico de abajo*), el consumo de energía en los EE.UU. ha caído en los últimos decenios por debajo de las previsiones, pero debe progresar más deprisa para llegar a las emisiones de dióxido de carbono del modelo alternativo, a menos que las energías renovables y la nuclear crezcan sustancialmente.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: JAMES HANSEN (*gráficos*); MARK BOULTON PHOTO RESEARCHERS, INC. (*fotografía*)

## PERO ¿QUE PASA CON ...?

**“¡El invierno pasado fue tan frío! ¡No noto ningún calentamiento global!”**
El calentamiento global es ubicuo, pero hasta ahora la temperatura sólo ha aumentado en 0,55 ºC. Las fluctuaciones meteorológicas de un día para otro son de alrededor de 5 grados. Incluso promediando a lo largo de una estación, la variabilidad natural (entre una estación y la misma del año siguiente) viene a ser de un grado, de modo que el calentamiento global no hace que cada estación sea más cálida que unas docenas de años atrás. Pero el calentamiento global sí hace ya que la probabilidad de una estación más cálida de lo “normal” sea del 60 por ciento, en lugar del 30 por ciento que se daba entre 1950 y 1980.

**“El calentamiento del siglo pasado no fue más que la reacción natural tras la Pequeña Edad de Hielo”**
Cualquier reacción a la Pequeña Edad de Hielo europea, cuyo máximo tuvo lugar entre 1650 y 1750, se habría completado casi del todo al llegar el siglo XX. En realidad, la tendencia climática natural a largo plazo sería hoy hacia un clima más frío, si no fuera por las actividades humanas.

**“¿No está el calentamiento antropogénico global librándonos de la próxima Edad de Hielo?”**
Sí, pero ya hemos añadido a la atmósfera muchos más gases de los que se necesitarían para eso.

**“El calentamiento en superficie se debe sobre todo a las ‘islas térmicas urbanas’ cercanas a las estaciones meteorológicas”**
No. Como se había predicho, el máximo calentamiento se encuentra en regiones remotas, tales como Asia central y Alaska. Las mayores regiones de calentamiento en superficie se hallan sobre los océanos, lejos de las zonas urbanas. De los perfiles de temperatura en los continentes, que se conocen gracias a cientos de perforaciones efectuadas en todo el mundo, se sigue que las superficies continentales se han calentado entre 0,5 grados y un grado en el siglo pasado.

**“Los cambios climáticos se deben sobre todo a la variabilidad solar”**
La intensidad de la radiación solar oscila. Su disminución pudo ser la causa, al menos parcial, de la Pequeña Edad de Hielo. Según las mejores estimaciones, el Sol ha aportado alrededor de un cuarto del calentamiento global habido entre 1850 y 2000. Las perturbaciones inducidas por los gases de invernadero superan ahora al solar; crecen, además, monótonamente, mientras que no se espera ninguna tendencia significativa a largo plazo del Sol.

**“El calentamiento global sería despreciable en caso de verificarse el ‘efecto iris’, una hipótesis de Richard Lindzen”**
Esta retroalimentación climática, donde las nubes tropicales dejarían escapar más radiación al calentarse la Tierra, ha quedado refutada por pruebas *in situ* y datos de satélite. Más en general, debe tenerse en cuenta que cualquier retroalimentación que haya podido haber alguna vez queda incluida en las medidas empíricas de la sensibilidad climática proporcionadas por la historia de la Tierra.

generación de energía nuclear, si fuera aceptable para el público, podría contribuir. Quizá se descubran antes de 2050 técnicas nuevas que ahora ni nos imaginamos.

Las tendencias mundiales del dióxido de carbono y del metano observadas en los últimos años muestran que el mundo real está quedándose por detrás de todos los cuadros hipotéticos del PICC. Falta por ver si estos menores ritmos de crecimiento son una racha de suerte, para volver pronto a los del PICC, o si indican una diferencia permanente. Por el contrario, las previsiones de mi modelo hipotético alternativo concuerdan con los ritmos de crecimiento observados. Fue elaborado teniendo presentes las observaciones. Y en los tres años transcurridos desde que fue enunciado, las observaciones han continuado por el mismo camino. No debe entenderse, sin embargo, que mi hipótesis de futuro se pueda alcanzar sin esfuerzos concertados para reducir las agresiones antropogénicas.

¿Cómo puedo ser optimista si el clima está más cerca del nivel de interferencia antropogénica peligrosa de lo que se había creído? Si comparamos la situación hoy con la de hace 10 o 15 años, veremos que los principales elementos requeridos para detener el cambio climático han empezado a actuar con notable celeridad. Me doy cuenta de que no será fácil estabilizar las concentraciones de gases de invernadero, pero soy optimista porque espero que las pruebas experimentales del cambio climático continuarán acumulándose y que ello influirá sobre el público, las organizaciones civiles, la industria y los gobiernos. La pregunta es: ¿intervendremos a tiempo?

JAMES HANSEN

### El autor

**James Hansen** es director del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA e investigador del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia. Obtuvo su doctorado en física y astronomía en la Universidad de Iowa, donde fue alumno de James Van Allen. Sus declaraciones ante comités del Congreso de Estados Unidos en el decenio de 1980 contribuyeron a que se tomara conciencia del problema del calentamiento global.

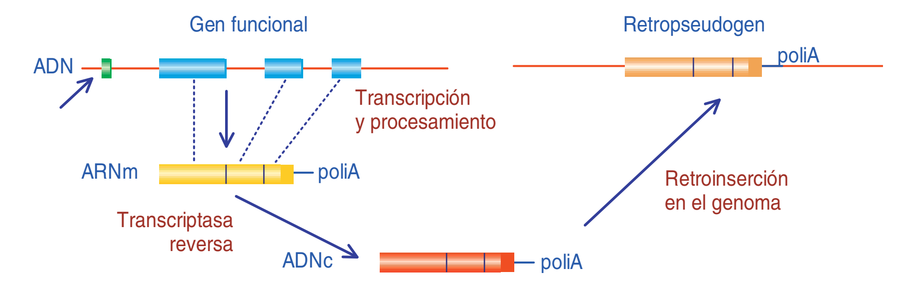
## Evolución genómica

### *Aparición y divergencia de retropseudogenes*

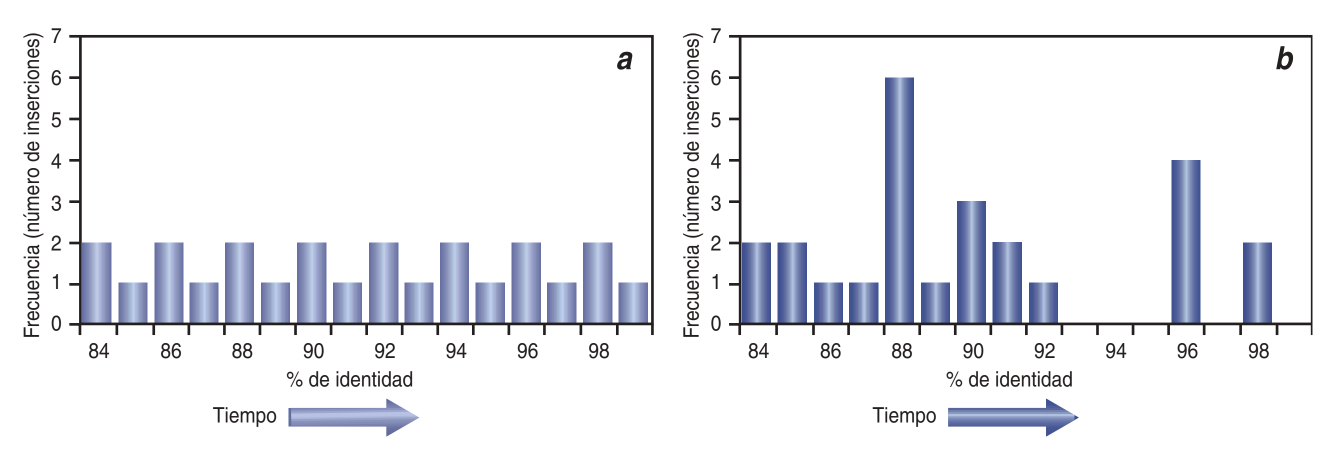
Cincuenta años de biología molecular nos han enseñado, entre otras muchas cosas, que los cambios en los patrones de expresión génica desempeñan un papel clave en la especiación de los organismos. Como si de ventanas al pasado se trataran, ciertas secuencias del genoma pueden usarse para detectar dichos cambios evolutivos en la expresión génica.

En los genomas procariotas, los genes incluyen la mayor parte del ADN. Sin embargo, en los eucariotas (mamíferos en particular, incluido el hombre), la porción de secuencias codificadoras de proteínas (exones) apenas corresponde al dos por ciento de un total de 3000 millones de nucleótidos. Además de los intrones (fragmentos no codificadores de un gen), el 98 por ciento restante está constituido por un conjunto heterogéneo de secuencias mayoritariamente repetitivas sin función codificante o reguladora clara, al que algunos autores han denominado "ADN basura" y que a nosotros nos gusta llamar "el lado oscuro del genoma". Indudablemente, resulta difícil creer que nuestro genoma arrastre tal cantidad de "chatarra evolutiva", si consideramos el costo energético que esto conlleva. Aunque todavía no comprendemos muchos aspectos relacionados con este ADN, sus secuencias contienen una cantidad extraordinaria de información acerca de procesos biológicos y la evolución de los organismos.

En ese ADN no codificador encontramos, entre otros elementos extraños, a los retropseudogenes. Tenemos en nuestro genoma secuencias repetitivas (retroelementos) que se dispersan por medio de un mecanismo de retrotransposición. Estos codifican una enzima denominada transcriptasa reversa que usa un molde de ARN para hacer una copia de ADN. Esta copia del retroelemento se reinserta en el genoma. Ocasionalmente y de manera accidental, este mecanismo utiliza como molde uno de nuestros propios ARN mensajeros. Como consecuencia, regresa al genoma una copia procesada (sin intrones, ni secuencias reguladoras) de alguno de nuestros genes. A éstos se les denomina retropseudogenes (*figura 1*). Además, al regresar al genoma pierden la capacidad de transcribirse y acumulan mutaciones, divergiendo de la secuencia codificadora del gen funcional. Estos incidentes moleculares son relativa-




1. Mecanismo de formación de retropseudogenes. Los retropseudogenes son la consecuencia de la actividad accidental de la transcriptasa reversa que utiliza un ARN mensajero y genera una copia de ADN que se inserta en el genoma. Carecen de promotor e intrones y pueden contener restos de la cola de Poli-A. Se pueden localizar en cualquier cromosoma; puesto que no están sujetos a presiones de selección, su secuencia acumula mutaciones aleatoriamente.




2. Dinámica de la producción de retropseudogenes. Ejemplo hipotético de un proceso aleatorio, que indica un nivel de expresión génica constante (*a*). Ejemplo de aumento y disminución en la frecuencia de generación de retropseudogenes, reflejo de cambios evolutivos en los patrones de expresión génica (*b*).

mente frecuentes, por lo que nuestro genoma alberga un gran número de retropseudogenes (aproximadamente 25.000). Cuanto mayor sea el nivel de expresión de un determinado gen, mayor será la concentración de su ARN mensajero en el citoplasma y, por lo tanto, mayor la cantidad de sus retrocopias.

Las bases de datos de secuencias genéticas permiten evaluar y caracterizar algunos aspectos de la inserción de retropseudogenes en el genoma humano. Primero, escogemos la secuencia codificadora de algún gen de interés. A continuación, buscamos secuencias similares en las bases de datos utilizando el BLAST, un algoritmo global de identificación de secuencias relacionadas. En su mayoría, estas secuencias corresponden a retropseudogenes. El siguiente paso consiste en comparar la secuencia del retropseudogen con la del gen funcional correspondiente. El grado de divergencia entre las dos secuencias se expresa como porcentaje de identidad y nos informa acerca de la evolución del genoma (mayor antigüedad se traduce en mayor divergencia y, por tanto, en menor porcentaje de identidad). En este sentido, los retropseudogenes pueden usarse como relojes moleculares.

Suponemos que la probabilidad de que un ARN mensajero particular sea usado por la transcriptasa reversa es aleatoria. Si andamos en lo cierto, la aparición y divergencia de los retropseudogenes resultaría directamente proporcional al tiempo transcurrido y a la vez sería función de la concentración intracelular de un ARN mensajero concreto; ésta se halla determinada por su nivel de expresión en las células de la línea germinal (*véase la figura 2a*). Sin embargo, nuestros análisis evolutivos muestran que estas inserciones eventuales no siempre siguen un patrón aleatorio. Por el contrario, en algunos casos hemos observado una distribución claramente irregular: en ciertos períodos cortos de tiempo aparecen muchos más retropseudogenes que en otros (*véase la figura 2b, como un ejemplo*).

Nuestra hipótesis sugiere que estos aumentos y disminuciones reflejan cambios evolutivos en los patrones de expresión de genes individuales. Dicho de otra forma, para algunos genes, la frecuencia con la que aparecen sus retropseudogenes responde a la adaptación de nuestros ancestros ante cambios en el ambiente. Resultados preliminares con el genoma del ratón también muestran patrones irregulares de las inserciones de algunos retropseudogenes, si bien no coinciden con las del genoma humano. A la luz de estos resultados, podemos proponer que las presiones del medio y las respuestas adaptativas han sido diferentes en los caminos evolutivos de estas dos especies.

No considerar a las secuencias no codificantes de nuestro genoma, incluidos los retropseudogenes, significaría perder una importante parte de lo que nos hace humanos. Nuestro genoma no sólo contiene las secuencias codificadoras y reguladoras que se expresan fenotípicamente en forma de proteínas. El genotipo constituye un registro de la historia evolutiva de nuestra especie. Tres mil millones de pares de bases nos hablan sobre nuestro pasado, nuestro presente y tal vez nuestro futuro.

VÍCTOR VALDÉS LÓPEZ,
ALFONSO VILCHIS PELUYERA,
LUISA ALBA LOIS,
BEATRIZ RODARTE MURGUÍA,
CLAUDIA SEGAL KISCHINEVZKY,
BIBIANA RODRÍGUEZ PONCE
y LUIS ALCARAZ PERAZA
Laboratorio de Biología Molecular y Genómica
Dpto. de Biología Celular
Facultad de Ciencias UNAM, México

## La masa de los neutrinos

### *Una cota superior*

El debate acerca del papel desempeñado por las masas de los neutrinos en la historia del universo ha experimentado cambios profundos e inesperados en los últimos años. A principios del decenio de 1980 se creía que el principal componente de la densidad de energía del universo procedería de una masa neutrínica total de alrededor de 45eV: la suma de las masas fijas correspondientes a los estados que se mezclan cuánticamente para constituir los tres tipos, o sabores, de neutrinos del modelo estándar de las partículas elementales, el electrónico, el muónico y el tauónico. Esa densidad se acercaría al valor crítico que proporcionaría al universo la geometría plana requerida por la teoría de la inflación, o fase acelerada de expansión en los primeros instantes del universo; resolvería también quizá, con una explicación de la formación de las galaxias, los problemas planteados por un universo dominado por bariones.

Pero se comprobó que, según esta hipótesis de la "materia oscura caliente", las galaxias tendrían que haberse constituido mucho más tarde de lo que se observa.

Había, pues, que suponer que el componente dominante del universo era alguna nueva clase de partículas con masa, o "materia oscura fría". A mediados del decenio de 1990 se pensó que una hipótesis mixta, de materia oscura fría y caliente, sería la mejor explicación de la manera en que se forman las galaxias; alrededor del 70 % de la densidad de energía consistiría en materia oscura fría y todavía habría que contar con una masa neutrínica total de alrededor de 10 eV que proporcionase el componente caliente.

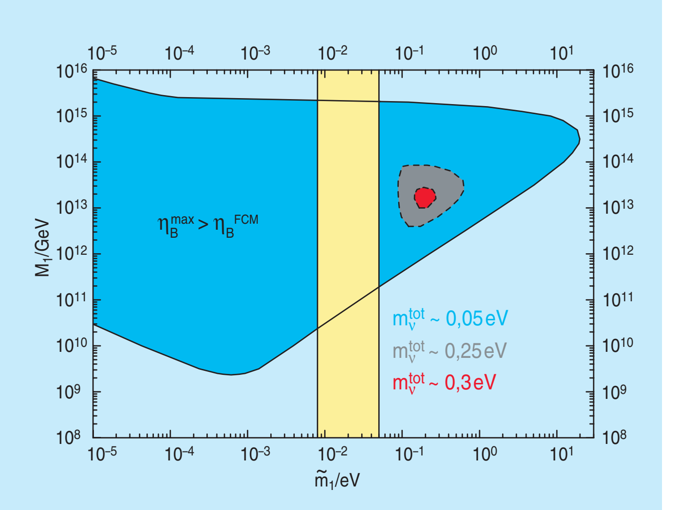
SuperKamiokande, un experimento japonés que estudia los neutrinos procedentes de la atmósfera, daba en 1998 la primera prueba sólida de que los tres sabores de neutrinos se mezclan, lo que sólo es posible si tienen masa. Estableció además un límite inferior de la masa neutrínica total: alrededor de 0,05 eV. Cabía interpretar que este descubrimiento respaldaba que los neutrinos eran los componentes de la materia oscura caliente. Sin embargo, ese mismo año las observaciones de supernovas lejanas, con un elevado desplazamiento de su luz al rojo debido a la expansión del universo, indicaban que ésta se ace-

LA LEPTOGENESIS es una explicación de la inexistencia de antimateria en el universo. La atribuye a unos neutrinos pesados, no incluidos en el modelo estándar de las partículas elementales, que en los primeros tiempos del universo se habrían desintegrado con mayor frecuencia en partículas que en antipartículas. Las partículas actuales serían las creadas en exceso por ese mecanismo; las otras se desintegraron con sus correspondientes antipartículas.

Tres parámetros rigen cuantitativamente la asimetría máxima, $\eta_B^{máx}$, que la leptogénesis pudo generar entre materia y antimateria —el máximo valor de la diferencia del número de bariones y el de antibariones dividida por el número de fotones—: la masa $M_1$ del tipo más ligero de neutrino pesado, la raíz cuadrada ($\bar{m}_\nu$) de los cuadrados de los tres valores fijos que pueden arrojar las mediciones de las masas de los neutrinos ordinarios y una masa efectiva $\tilde{m}_1$ (un cierto promedio de esos valores). Puede medirse en el fondo cósmico de microondas cuántos bariones hay por fotón, $\eta_B^{FCM}$. Este cociente (es del orden de $10^{-10}$) ha de ser menor que $\eta_B^{máx}$. Establecida esa condición, cada valor hipotético de $\bar{m}_\nu$ determina una región permitida en el espacio de los parámetros $M_1$ y $\tilde{m}_1$; fuera de ella, los valores de $\bar{m}_\nu$, $M_1$ y $\tilde{m}_1$ no son compatibles entre sí. A medida que $\bar{m}_\nu$ aumenta, la región permitida mengua; por encima de 0,3 eV, desaparece por completo. La leptogénesis dicta así una cota superior para $\bar{m}_\nu$.

Los experimentos que han demostrado que unos tipos de neutrinos ordinarios se convierten en otros han establecido las diferencias entre los cuadrados de los tres valores de la masa de los neutrinos. Los efectuados con neutrinos procedentes de la atmósfera arrojan para la raíz cuadrada de una de esas diferencias alrededor de 0,05 eV; los neutrinos emitidos por el Sol, para la otra, unos 0,008 eV. Estos datos fijan el mínimo de $\bar{m}_\nu$: 0,051 eV; por otra parte, marcan el intervalo donde es casi seguro que caiga $\tilde{m}_1$ para ese valor mínimo de $\bar{m}_\nu$. La región permitida abarca con holgura este intervalo de $\tilde{m}_1$ (en la intersección de la franja amarilla y la región azul de la gráfica).

La gráfica adopta una escala logarítmica. En vez de dar los valores de $\bar{m}_\nu$ para los que se representan las regiones permitidas, se indican valores correspondientes aproximados de $m_\nu^{total}$, la suma de los tres valores de masa neutrínicos.




lera y que el componente mayoritario de la densidad total de energía no consiste en partículas con masa, sino en una misteriosa forma de energía oscura, quizá identificable con la constante cosmológica Λ, introducida por Einstein en sus ecuaciones de la relatividad general.

Corroboraron este resultado nuevas observaciones de la radiación de fondo de microondas y las mediciones directas de la contribución de la materia a la densidad de energía. En esta nueva hipótesis de la materia oscura fría con Λ no queda mucho sitio para las masas de los neutrinos. El reciente experimento WMAP —una cartografía precisa de la radiación de fondo de microondas—, junto con el censo galáctico 2dF, limita la masa neutrínica total a menos de 0,7 eV. El descubrimiento del Superkamiokande daba, pues, la impresión de haber sido una especie de victoria pírrica del papel cosmológico de las masas de los neutrinos, pero una interpretación más honda sugiere otra interpretación.

El "mecanismo del balancín" (*seesaw-mechanism*) es la idea más prometedora acerca de la razón de que los neutrinos sean mucho más ligeros que las demás partículas con masa del modelo estándar. Predice la existencia de tres nuevos neutrinos muy pesados, aparte de los tres ordinarios. Su peso compensa la ligereza de los neutrinos ordinarios de manera que el producto de las escalas de masa de los neutrinos ligeros y de los pesados sea igual al cuadrado de la escala de energías donde, según el modelo estándar, se unifican las fuerzas electromagnética y débil, de unos 100 GeV.

Habida cuenta de la escala de masas de los neutrinos atmosféricos ligeros, del orden de las centésimas de eV, la de los neutrinos pesados, pues, habrá de ser del orden de unos $10^{14}$ GeV: con un valor tan alto, no hay esperanzas de llegar a contrastar el mecanismo del balancín en los aceleradores de partículas. Además, el tiempo medio de vida de estas partículas sería demasiado corto; aunque se produjesen muy al principio del universo, cuando su masa debía de ser inferior a la temperatura de éste, en cuanto la temperatura descendiese por debajo de su masa se desintegrarían muy deprisa y desaparecían por completo. Con todo, aun una aparición tan efímera habría dejado una huella importante hoy: ¡la existencia de la materia misma!

Según el modelo estándar, a cada especie de partícula cargada le corresponde su especie de antipartícula, de carga opuesta. La observación nos dice que el universo es muy asimétrico en este aspecto: no cuenta más que con materia; carece de antimateria. En 1967 Andrei Sajarov expuso que los modelos que describiesen la bariogénesis (la creación de los bariones) deberían cumplir tres condiciones, necesarias para explicar cómo pudo generarse esa asimetría entre la materia y la antimateria. El modelo estándar satisface las tres, pero no bastan para explicar el valor correcto de la asimetría observada; se necesita algún ingrediente nuevo, extraño al modelo estándar.

Masataka Fukujita y Tautomu Yanagida señalaron que los tres neutrinos pesados del mecanismo del balancín podrían aportar la solución: se desintegran en partículas y antipartículas con una probabilidad un poco distinta, suficiente para generar la asimetría que se observa hoy. Las masas de los neutrinos ligeros ordinarios entran en el cálculo de forma que la simetría predicha al final guarde una estrecha relación con sus valores.

Así, la explicación de dos hechos experimentales muy diferentes, las masas de los neutrinos y la distribución observada de la materia y la antimateria, se describen mediante un único entramado teórico. La elegancia de este modelo de la bariogénesis, que lleva el nombre de "leptogénesis", queda respaldada por los valores medidos. El límite inferior de la masa de los neutrinos atmosféricos cae en el intervalo necesario para explicar el valor correcto de la asimetría entre materia y antimateria. No obstante, la leptogénesis requiere también que la masa neutrínica total no pase de un valor límite de unos 0,3 eV; si no, unos procesos denominados de "eliminación" serían lo bastante fuertes para borrar la asimetría generada por las desintegraciones; el valor observado no podría explicarse entonces.

Esta predicción de la masa neutrínica total concuerda con el límite superior determinado por el satélite WMAP, ya mencionado, de 0,7 eV. En los próximos años, nuevos datos experimentales mejorarán este límite y comprobarán por completo la cota superior dictada por la leptogénesis. Tiene su gracia que el papel cosmológico de las masas de los neutrinos, tal y como sugiere la leptogénesis, dependa ahora de la posibilidad de que sean lo bastante pequeñas, mientras que durante mucho tiempo se creyó que dependía de que fueran lo bastante grandes.

PASQUALE DI BARI
IFAE,
Universidad Autónoma de Barcelona
Bellaterra

## Simulación numérica

### *Turbulencia en medios excitables y fibrilación cardiaca*

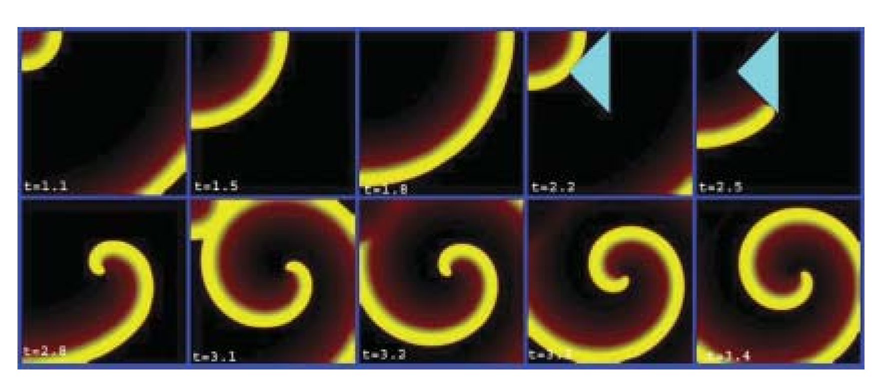
Aproximadamente una vez por segundo el corazón bombea la sangre hacia el resto del cuerpo. Este proceso se realiza mediante la contracción coordinada y rítmica de las fibras cardiacas. La pérdida de esta coordinación da lugar a ciertas patologías denominadas arritmias cardiacas, que en su episodio más grave, conocido como fibrilación, puede provocar la muerte del individuo, constituyendo una de las primeras causas de defunción en el mundo industrializado.

La coordinación mecánica de las fibras del corazón se consigue mediante la propagación de un potencial de acción a lo largo de las células del tejido cardiaco. El paso de este impulso eléctrico, básicamente controlado por una diferencia de concentraciones de iones entre el interior y el exterior de la membrana celular, induce la contracción de las fibras cardiacas.

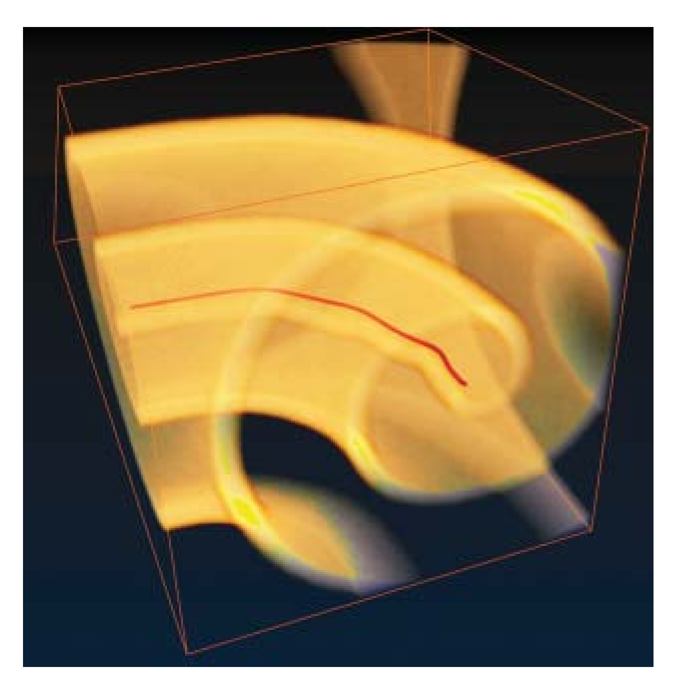
Si consideramos que dos impulsos que colisionen se aniquilan entre sí y que, después del paso de un impulso, el medio permanece en un estadio refractario durante el cual no permite, momentáneamente, la propagación de otro impulso, podremos considerar el tejido cardiaco como un ejemplo característico de medio excitable. Este tipo de medios activos ha sido objeto de estudio en el ámbito de la química-física y de la matemática no lineal.

De forma periódica, el nódulo seno-auricular del corazón emite una excitación que se propaga coherentemente por el tejido cardiaco. Pero bajo ciertas circunstancias la onda de excitación puede romperse y generar un extremo libre, formando una onda reentrante, estructurada en forma de espiral en rotación alrededor de un núcleo no excitable. La reentrada está asociada a episodios de taquicardia, ya que las fibras se contraen con la frecuencia de la onda reentrante, mayor que la periodicidad del nódulo seno-auricular (*véase la figura 1*). Ello da lugar a pulsaciones menos eficientes, y de mayor frecuencia, entre el doble y el triple de la frecuencia normal.

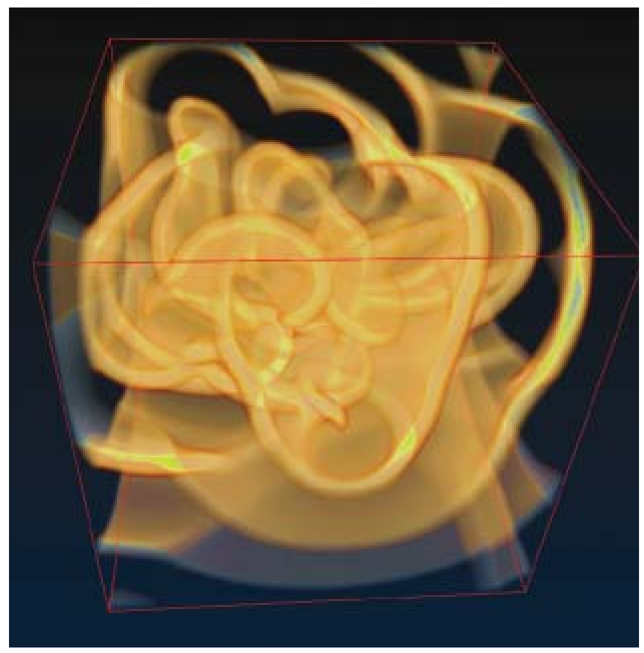
Ahora bien, por ser tridimensionales las paredes del corazón, estas ondas reentrantes tendrán una estructura más complicada. En realidad, en lugar de curvas que giran alrededor de un núcleo, debemos considerar superficies enrolladas, conocidas como ondas enrolladas (ondas en *scroll*), que dan vueltas en torno a un vórtice en forma de filamento. En la figura 2 se puede




1. Representación de la propagación de los impulsos cardiacos mediante un modelo matemático sencillo de un medio excitable. El extremo superior izquierdo genera periódicamente (t = 1) una excitación (*amarillo*) que se propaga por el medio, dejando a su paso el sistema en un estado refractario (*rojo*). En cierto instante, se introduce momentáneamente un obstáculo (*triángulo azul*), creando un extremo libre. Dicho extremo dibuja una espiral que rota con un período menor (0,35t) que el de la generación en el extremo superior izquierdo. Los tiempos correspondientes a cada imagen guardan la escala acorde con el período de generación.



2. Imagen de una onda enrollada (*en scroll*) en un sistema excitable tridimensional. La onda de excitación (*amarillo semitransparente*) gira alrededor del filamento (*rojo*). Visualización realizada en Zuse-Zentrum Berlín (ZIB).



3. Imagen del régimen turbulento en un sistema excitable tridimensional. Las ondas de excitación (*amarillo semitransparente*) presentan una estructura turbulenta o caótica. Visualización realizada en Zuse-Zentrum Berlín (ZIB).

observar un ejemplo de estas ondas en un cubo tridimensional. En la pared frontal del cubo se encuentra el límite bidimensional de estas estructuras, en forma de onda espiral.

En corazones de cierto tamaño, un episodio de taquicardia puede degenerar en un estado de fibrilación. Durante tales estados hay una contracción desordenada y arrítmica de las fibras cardiacas, que imposibilitan el bombeo correcto de la sangre.

Desde un punto de vista matemático existen diferentes rutas o mecanismos de desestabilización de las ondas reentrantes. Uno de estos mecanismos está asociado al hecho de que los filamentos (*véase la figura 2*) alrededor de los cuales giran las ondas tridimensionales pueden ser inestables, alargándose y doblándose a la manera de un ovillo desordenado, creando un patrón de propagación de los impulsos eléctricos (*véase la figura 3*), similar al encontrado durante los episodios de fibrilación. Este escenario reviste particular interés: al igual que la fibrilación, deriva de un proceso puramente tridimensional (en dos dimensiones la onda reentrante sería estable) y, además, tal mecanismo admite un proceso de control mediante un forzamiento global y periódico de las propiedades de excitabilidad del medio.

En efecto, recientemente en nuestro grupo y en colaboración con A. S. Mikhailov, del Instituto Fritz-Haber de Berlín (FHI), hemos conseguido demostrar, analíticamente y mediante simulaciones numéricas tridimensionales de modelos apropiados para sistemas excitables, que un débil forzamiento periódico de frecuencia superior a la característica de la rotación de las ondas alrededor del filamento consigue eliminar el episodio turbulento.

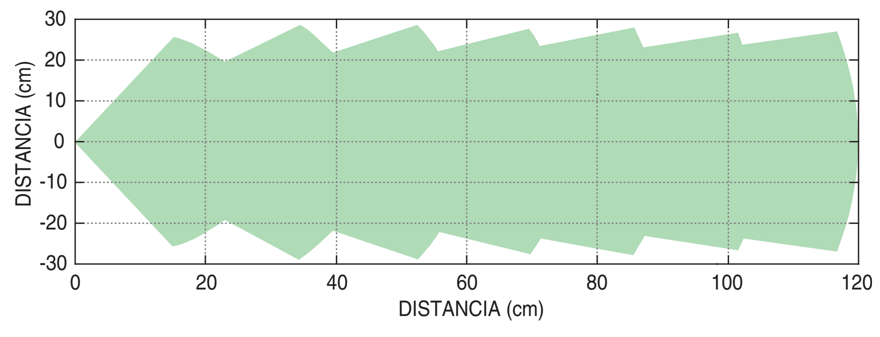
A pesar de que se trata de un estudio preliminar, basado en una simplificación de la dinámica de los impulsos, y que no toma en cuenta la complicada estructura fisiológica del corazón, la posibilidad que sugiere proponer nuevas estrategias de desfibrilación cardiaca que eviten los traumáticos tratamientos de choque en uso, ha suscitado un gran interés.

SERGIO ALONSO
FRANCESC SAGUÉS
Depto. de Química Física.
Facultad de Química
Universidad de Barcelona

## Sensor ultrasónico programable
*MOVIUS*

Una de las deficiencias más extendidas y limitantes para el desarrollo de la vida normal es la ceguera y, en general, la deficiencia visual. Esta última da cuenta del 8,6 % de todas las deficiencias. Desde los trabajos pioneros de Jean Piaget se sabe que la falta de visión repercute en el movimiento y en la estructuración de la inteligencia humana. Produce, además, conflictos emocionales de orientación dinámica.

Desde los primeros estadios del niño se precisa potenciar su relación con el medio, a través de los diferentes canales sensoriales para conseguir un adecuado desarrollo psicomotor. Cualquier mejora de la percepción en este sentido afectará, en el curso de la vida, a las




1. Diagrama de detección.

actividades relacionadas con la orientación, la movilidad, la manipulación e incluso la comunicación y la relación social.

Nosotros hemos desarrollado un sistema para ciegos y deficientes visuales que permite detectar objetos en un entorno definido y próximo, de forma fiable. Se llama MOVIUS. Mediante canales alternativos, se comunica al usuario la posición aproximada de éstos y se obtiene así cierta representación del espacio circundante de la zona frontal.

El dispositivo desarrollado emplea la emisión, la reflexión y la recepción (técnica pulso-eco) de ultrasonidos como medio físico de detección. Se utiliza el principio de medida diferencial de fase de la onda ultrasónica reflejada, que es captada en dos puntos próximos mediante sendos receptores (transductores piezoeléctricos).

No se trata aquí de obtener las coordenadas precisas del objeto, pues el problema de movilidad no requiere tal nivel de detalle, ni se dispone de un canal potente de transmisión de información al usuario. Sin embargo, la información adquirida sirve para definir y delimitar de una forma absolutamente fiable el campo de detección del conjunto sensor. La distancia se mide por el tiempo transcurrido desde el momento de emisión hasta la recepción; el ángulo respecto del eje de emisión, a su vez, se mide por la diferencia de fase de las señales, correspondiente a la diferencia de caminos hacia sendos receptores.

Por consiguiente, el eco de un objeto es admitido o rechazado en función de la pertenencia o no a un lugar geométrico configurado por zonas discretas, que se han definido de antemano por correspondencias de distancias y ángulos. De ese modo, puede definirse prácticamente cualquier figura geométrica como campo de detección.

El sistema MOVIUS comprende una unidad sensora, que contiene los transductores de emisión y recepción; se sitúa a la altura del pecho, colgada del cuello del usuario. Conectada eléctricamente a esta unidad, se dispone la unidad electrónica de procesamiento, que, soportada a modo de bandolera, contiene la batería y un microcontrolador, que realiza las funciones de excitación, adquisición y tratamiento de señales para identificación y selección espacial de ecos en función del campo de detección configurado previamente. La comunicación de estos obstáculos al usuario se realiza a través de dos generadores de pitidos, de vibraciones o de ambos, de frecuencia variable.

Los beneficios principales que aporta MOVIUS se derivan de poder configurar el haz de detección según una forma espacial determinada, programable y conmutable entre varias opciones almacenadas. No está restringido rígidamente por el lóbulo de radiación de los transductores de emisión/recepción. Se soslayan así también los problemas de indeterminación en la detección, que en otros sistemas dependen de la transmisión y de las características superficiales y de posición, orientación o rugosidad del reflector. Quedan, pues, eliminadas las incertidumbres propias de este tipo de detectores, en particular en las zonas de los bordes.

Por todo ello, en el sistema MOVIUS, una vez superado un umbral mínimo, cualquier objeto que sea detectable lo será en todo el campo de detección y nunca fuera del mismo por próximo y voluminoso que sea.

No se intenta con este sistema sustituir al bastón, medio realmente simple, fiable y económico. Antes bien, se pretende complementarlo al posibilitar este nuevo dispositivo detectar objetos situados en un espacio superior, correspondiente al que se le presenta al peatón a la altura del tórax y que el bastón no es capaz de detectar en sus barridos habituales. La posibilidad de chocar con tales objetos genera en las personas con deficiencia visual cierto temor e inseguridad en sus desplazamientos por el riesgo real de daño. Adicionalmente, el sistema desarrollado detecta objetos más lejanos que el bastón y efectúa barridos del campo de detección definido de forma más rápida y sin intervención humana.

Con los avances conseguidos se pretende en un futuro próximo introducir en el mercado un dispositivo que haga más fácil y seguro el desplazamiento a los deficientes visuales para lograr un mayor grado de autonomía en sus diferentes actividades.

SENSORES DE ULTRASONIDOS
INTERFACE CON EL USUARIO
Motor electrodinámico
Zumbador
Configuración
Circuitos de acondicionamiento
Sistema digital
MICROCONTROLADOR 87C196KC
Sistema electrónico

2. Diagrama de bloques.

RAMÓN CERES, J. M. MARTÍN,
L. A. PÉREZ, F. SECO,
L. CALDERÓN,
J. LUIS PONS, A. R. JIMÉNEZ
Instituto de Automática
Industrial (CSIC)
Madrid

# Biotecnología

## *Oxidación enzimática de contaminantes orgánicos*

La intensa actividad industrial y agrícola que tantos beneficios ha traído a la humanidad acarrea asimismo una consecuencia menos grata: la contaminación de suelos, hidrosfera y atmósfera. Las técnicas desarrolladas para remediar y prevenir tan nocivo efecto se enfrentan a contaminantes cada vez más difíciles de eliminar, debido a su procedencia sintética. Pese a numerosos avances, aún quedan muchos ecosistemas por restaurar y el riesgo de nuevas contaminaciones persiste. Afortunadamente, las regulaciones ambientales son cada vez más exigentes en cuanto a la emisión de productos tóxicos. En consecuencia, las estrategias para evitar derrames o restaurar ambientes perjudicados deben revisarse continuamente.

Para descontaminar un entorno, a menudo se necesita recurrir a la combinación de diferentes tratamientos. En función del contaminante, se empieza con métodos fisicoquímicos, como la adsorción y la extracción con solventes o surfactantes, o biológicos, que usan microorganismos para la remoción de materia orgánica. Los tratamientos enzimáticos se aplican habitualmente para pulir el proceso, como accesorios. Sin embargo, su capacidad para desintoxicar mediante una única etapa les confiere un potencial relevante.

Las enzimas más utilizadas en la descontaminación ambiental son las oxidativas: lacasas y peroxidasas. En especial, las provenientes de hongos de pudrición blanca como *Phanerochaete crysosporium* y *Pleourotus ostreatus*. Estas enzimas reconocen una amplia variedad de sustratos. En la industria farmacéutica se utilizan para catalizar la oxidación enantioselectiva de compuestos orgánicos (olefinas, sulfuros, hidrocarburos aromáticos, carbohidratos, etc.) y así obtener moléculas de interés comercial.

En cuanto a su aplicación ambiental, las lacasas y peroxidasas catalizan la oxidación de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA), colorantes tipo azo (derivados de aminas aromáticas), plaguicidas organofosforados y clorados, y fenoles. Debido a su carácter mutagénico y carcinógeno, la toxicidad de estas sustancias resulta alarmante: el envenenamiento por plaguicidas organofosforados se cobra alrededor de 8 millones de muertes cada año; de las 8000 toneladas de colorantes tipo azo que se producen anualmente, entre el 5 y el 10 por ciento se arroja a los mantos acuíferos, donde la biota puede transformarlos en aminas carcinogénicas; se han encontrado concentraciones elevadas de HPA en la atmósfera, aguas y suelos, resultantes de derrames y combustiones incompletas.

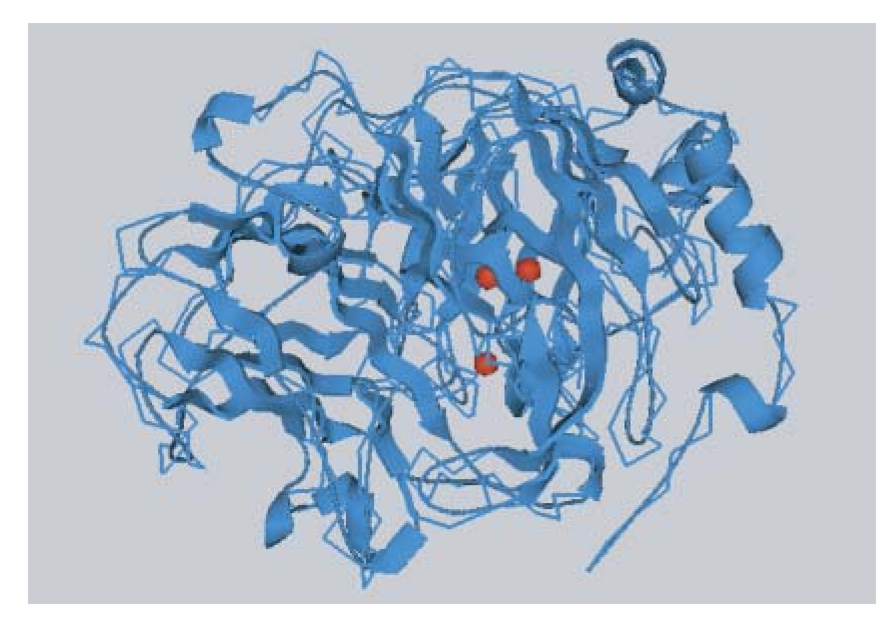
La oxidación catalizada por lacasas y peroxidasas rebaja significativamente la toxicidad de estos contaminantes (hasta en tres órdenes de magnitud); incluso puede llegar a anularla. Además, la oxidación enzimática incrementa la solubilidad en agua de estas moléculas; ello facilita su posterior degradación, ya sea mediante otro tratamiento enzimático o por acción microbiana.

Pese a tratarse de potentes catalizadores, estas enzimas aún tardarán en salir del laboratorio para aplicarse en la industria. Su principal limitación reside en la inestabilidad. En los ambientes a restaurar, como suelos contaminados y efluentes de residuos agroindustriales o urbanos, abundan compuestos que pueden resultar tóxicos para las enzimas (metales y sales) y microorganismos endógenos que degradan las proteínas. Además, la acidez (o alcalinidad) del medio suele presentar valores extremos. Convendría, pues, desarrollar biocatalizadores más resistentes a las condiciones de los entornos contaminados.

Por otro lado, las fuentes de producción de estas enzimas son aún las naturales (crecimiento del hongo sobre avena, trigo, sorgo, etc.), lo que las encarece demasiado. Sin duda, las técnicas que permitan abaratar los costos de producción de los biocatalizadores acelerarán su aplicación industrial.

La biotecnología ofrece alternativas de bajo costo energético y respetuosas con el entorno. Estas pueden utilizarse para sustituir o complementar procesos químicos ya existentes y así mejorar la eficiencia del tratamiento. En algunos casos, la aplicación de enzimas purificadas podría traducirse en procesos de fácil manejo, con subproductos inocuos y catalizadores biodegradables.

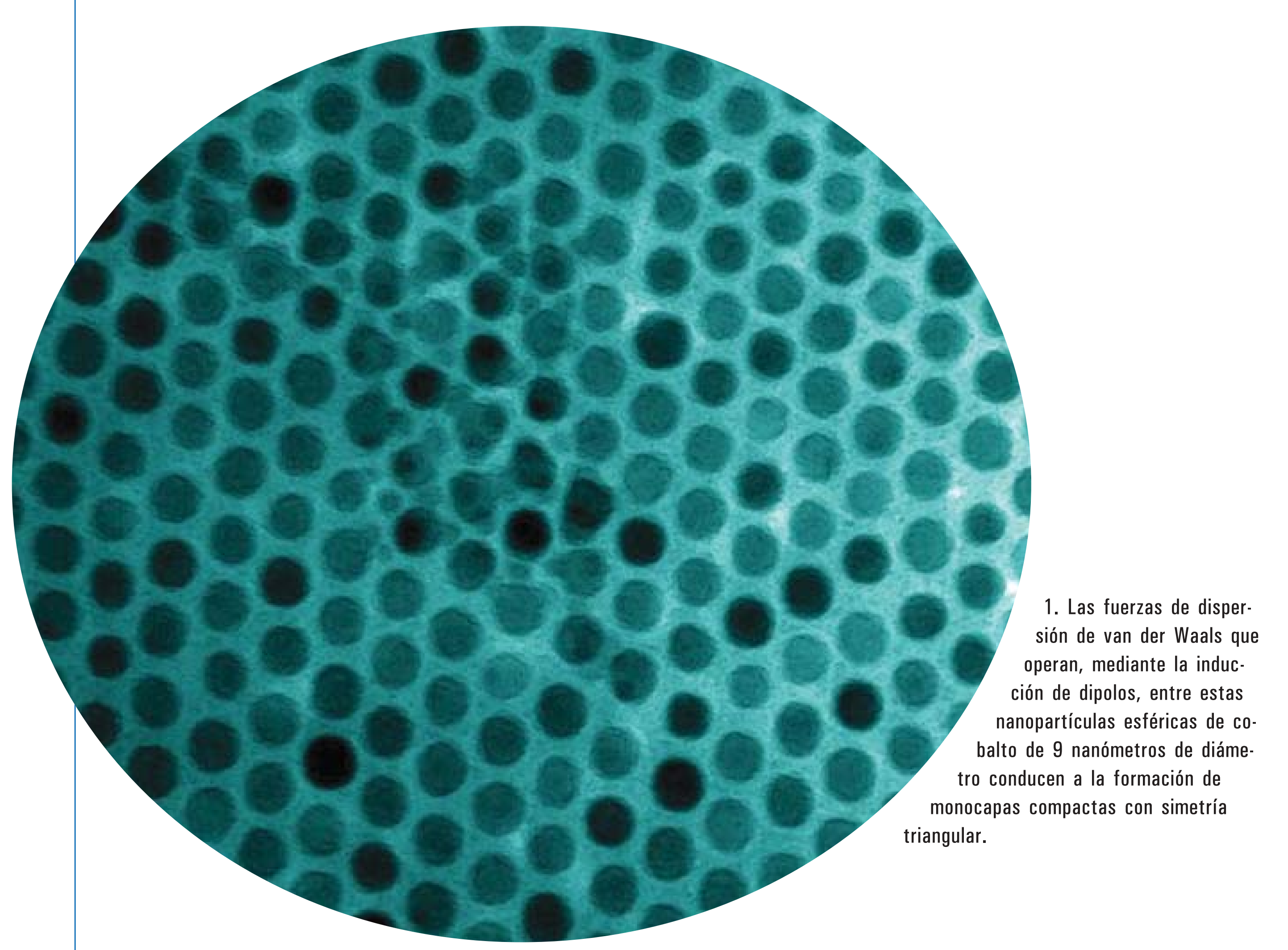
EDUARDO TORRES RAMÍREZ
Instituto Mexicano del Petróleo,
México



Estructura de la lacasa del hongo *P. ostreatus*. En color rojo se destacan los átomos de cobre, presentes en el sitio activo.

Autor: Víctor F. Puntes

## Nanoestructuras de cobalto



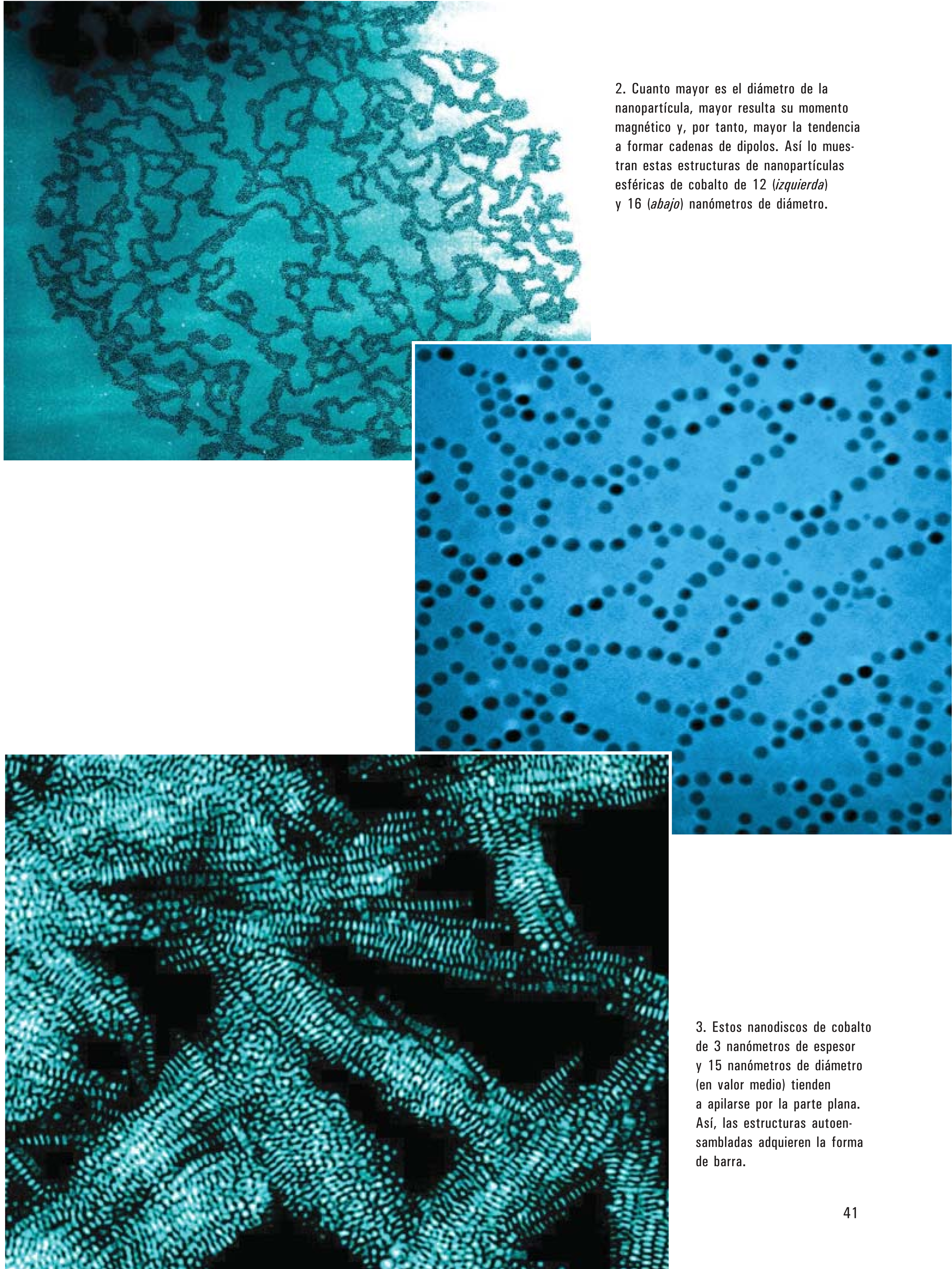
1. Las fuerzas de dispersión de van der Waals que operan, mediante la inducción de dipolos, entre estas nanopartículas esféricas de cobalto de 9 nanómetros de diámetro conducen a la formación de monocapas compactas con simetría triangular.

El cobalto constituye un elemento químico del mayor interés. Entra en la composición de materiales muy dispares en sus propiedades estructurales, magnéticas, electrónicas y catalíticas.

En particular, merced a sus propiedades, se nos ofrece como un excelente candidato para el almacenamiento magnético de información. Las estructuras que mejor se adaptan a las exigencias de este tipo de aplicación son las de tamaño nanométrico (un nanómetro corresponde a la millonésima parte de un milímetro). De ahí que en los últimos años se haya intensificado la investigación en la síntesis de nanopartículas de cobalto.

Importa sobremanera que las nanopartículas de cobalto (agrupaciones de átomos de cobalto) se ensamblen en nanoestructuras ordenadas y formen nanocristales. Pero no resulta fácil conseguir que tales unidades se ordenen con tamaña regularidad. Entre ellas operan interacciones electromagnéticas intermoleculares muy diversas; por citar algunas: gran afinidad electrónica, elevada tensión superficial, fuerzas de dispersión de van der Waals e interacciones dipolo-dipolo.

Cuando se evapora una solución coloidal de nanopartículas de cobalto sobre un substrato, se obtienen estructuras complejas, fruto del equilibrio entre todas esas interacciones. El proceso recuerda el que dirige la autoorganización de las macromoléculas biológicas, como el propio ADN o las proteínas. Las fotos de microscopía electrónica de transmisión que ofrecemos muestran algunos de estos autoensamblajes de cobalto. En función del tamaño y la forma de las nanopartículas, se obtienen monocapas, cadenas o discos apilados.



2. Cuanto mayor es el diámetro de la nanopartícula, mayor resulta su momento magnético y, por tanto, mayor la tendencia a formar cadenas de dipolos. Así lo muestran estas estructuras de nanopartículas esféricas de cobalto de 12 (*izquierda*) y 16 (*abajo*) nanómetros de diámetro.

3. Estos nanodiscos de cobalto de 3 nanómetros de espesor y 15 nanómetros de diámetro (en valor medio) tienden a apilarse por la parte plana. Así, las estructuras autoensambladas adquieren la forma de barra.

# El cerebro adicto

**El consumo de drogas produce trastornos duraderos en el circuito de recompensa del cerebro. La comprensión de las bases moleculares de dichas alteraciones ofrece nuevos enfoques para tratar el comportamiento compulsivo del adicto**

Eric J. Nestler y Robert C. Malenka

Rayas blancas sobre el espejo. Una aguja y una cuchara. Sólo con ver la droga o cualquiera de los utensilios que la suelen acompañar, el toxicómano empieza a estremecerse. Anticipa el placer. Luego, vaciada la jeringa, llega la euforia real: calor, claridad, visión, alivio, sensación de ocupar el centro del universo. Durante unos instantes, todo parece hermoso. Pero algo ocurre tras el consumo repetido de una droga, sea ésta heroína, cocaína, whisky o anfetamina.

La dosis que antes producía euforia empieza a resultar insuficiente. Pincharse o aspirar el narcótico se convierten en una necesidad. Sin la droga, se hunde en la depresión y, a menudo, enferma. Empieza a drogarse de forma compulsiva. Se ha hecho adicto. Pierde el control sobre el narcótico y sufre el síndrome de abstinencia. El hábito mina su salud, su bolsillo y su relación con los demás.

Por tratarse de sustancias químicas que intensifican el sistema cerebral de recompensa, las drogas producen sensación de euforia. Dicho sistema está formado por un complejo circuito de neuronas que ha evolucionado para proporcionarnos el placer de la mesa y del sexo, actividades necesarias para sobrevivir y transmitir nuestros genes. Al menos inicialmente, la excitación de este sistema nos aporta bienestar y nos anima a repetir cualquier actividad que nos produzca placer.

De acuerdo con la investigación reciente, el consumo repetido de drogas induce cambios en la estructura y la función de las neuronas del sistema de recompensa que persisten semanas, meses o incluso años tras la última dosis. En un mecanismo perverso, esta adaptación del cerebro suprime los efectos placenteros que el adicto busca en las sustancias psicoactivas. El deseo vehemente y compulsivo de droga le atrapa en una espiral de consumo, a la vez que fomenta el absentismo laboral y el abandono del hogar. Una mayor comprensión de estas alteraciones neuronales debería contribuir al desarrollo de nuevos tratamientos de la adicción que ayudaran a recuperar el cerebro y la vida del drogadicto.

## Comportamiento compulsivo

Estudios con animales de laboratorio, iniciados hace ya unos cuarenta años, han permitido comprobar que varias drogas siguen una misma trayectoria cerebral en su progreso del consumo a la adicción. Si se les brinda la oportunidad, ratas, ratones y primates no humanos se autoadministrarán las mismas substancias con las que se droga el hombre. En estos experimentos, los animales se conectan a una vía de inyección intravenosa. Aprenden a apretar tres palancas: una para recibir una infusión intravenosa de droga, otra para inyectarse una solución salina inocua y una tercera para alcanzar el alimento. En pocos días, los animales se han habituado: se autoadministran con toda facilidad cocaína, heroína, anfetamina y otras.

Aún más, acaban presentando comportamientos típicos de la adicción. Para drogarse, son capaces de renunciar a la comida y el sueño; algunos incluso llegan a morir por agotamiento o malnutrición. En el caso de las sus-

JANA BRENNING (*la fotografía sólo cumple la función de una ilustración artística*)



LA ADICCION se debe, en parte, a la acción de las drogas habituadoras sobre el circuito cerebral de recompensa. En razón de esa incidencia, el paciente las busca compulsivamente como lo más deseable del mundo.

tancias más adictivas, como la cocaína, los animales pasarán la mayor parte del tiempo en vigilia, afanándose por conseguir otra dosis, aun cuando eso signifique tener que presionar la palanca cientos de veces para obtenerla. Igual que los adictos humanos, a los que cualquier referencia a la droga (sea el lugar de consumo o los útiles de su aplicación) les provoca una intensa ansiedad por conseguir una dosis, los animales terminan por preferir un entorno relacionado con el estimulante (la zona de la jaula donde se halla la palanca que les proporciona bienestar).

Cuando se les quita la sustancia, los animales pronto abandonan ese afán por la compensación química. Pero no olvidan el placer. Una rata que haya permanecido "limpia", incluso durante meses, volverá a presionar de forma compulsiva la palanca si se le deja probar cocaína

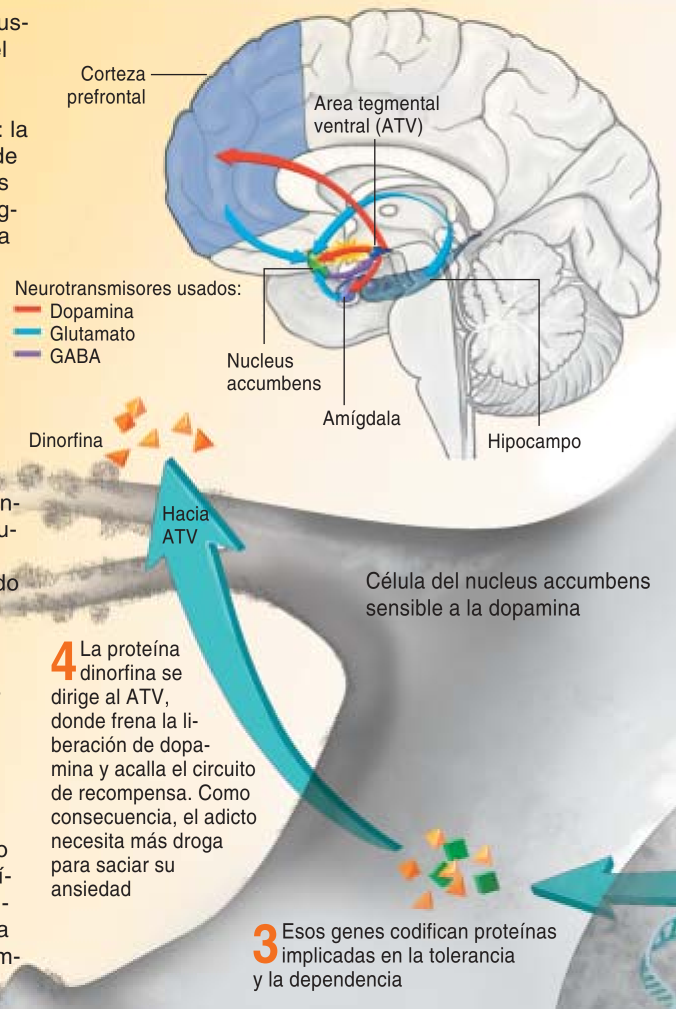
o se le encierra en una jaula que ella asocia con su consumo. De modo parecido, las señales que puedan convertirse en indicadores del suministro de droga, como una descarga eléctrica en la pata, provocarán que la rata vuelva a la droga. Los mismos tipos de estímulos —exposición a dosis bajas o signos vinculados al estupefaciente— despiertan el deseo y provocan la recaída en el adicto humano.

Apoyándose en tales experimentos de autoadministración, se han cartografiado las regiones del cerebro que participan en el comportamiento adictivo y se ha descubierto la función principal del sistema de recompensa. Las drogas se hacen con el control del sistema y estimulan su actividad con una energía y persistencia superiores a cualquier recompensa natural.

Un componente clave del circuito de recompensa es el sistema mesolímbico de la dopamina: un conjunto de células nerviosas que tienen su origen en el área tegmental ventral (ATV, cerca de la base del cerebro) y dirigen sus proyecciones hacia determinadas regiones del prosencéfalo, muy en particular hacia el nucleus accumbens. Esas neuronas del ATV se comunican enviando dopamina (un neurotransmisor) desde los extremos de sus axones hasta los receptores alojados en las neuronas del nucleus accumbens. La vía de la dopamina desde el ATV hasta el nucleus accumbens resulta decisiva para la adicción: los animales que sufren una lesión de esas regiones no vuelven a mostrar interés alguno por las sustancias adictivas.

## EL CEREBRO DEL DROGADICTO

EL USO CRONICO de sustancias adictivas altera el funcionamiento de una parte central del circuito cerebral de recompensa: la vía que se extiende desde las neuronas productoras de dopamina del área tegmetal ventral (ATV) hasta las células sensibles a la dopamina del nucleus accumbens. Esos cambios (inducidos en parte por las acciones moleculares representadas a la derecha y en el gráfico) promueven la tolerancia, la dependencia y el síndrome de abstinencia, que alientan el consumo crónico y la recaída, incluso pasado un período prolongado desde su abandono. Las flechas de color del dibujo del cerebro señalan algunas de las vías que unen el nucleus accumbens y el ATV con otras regiones que promueven la sensibilidad del adicto ante recuerdos placenteros, lo tornan vulnerable a recaídas en momentos de tensión y le incapacitan para controlar la ansiedad compulsiva de droga.



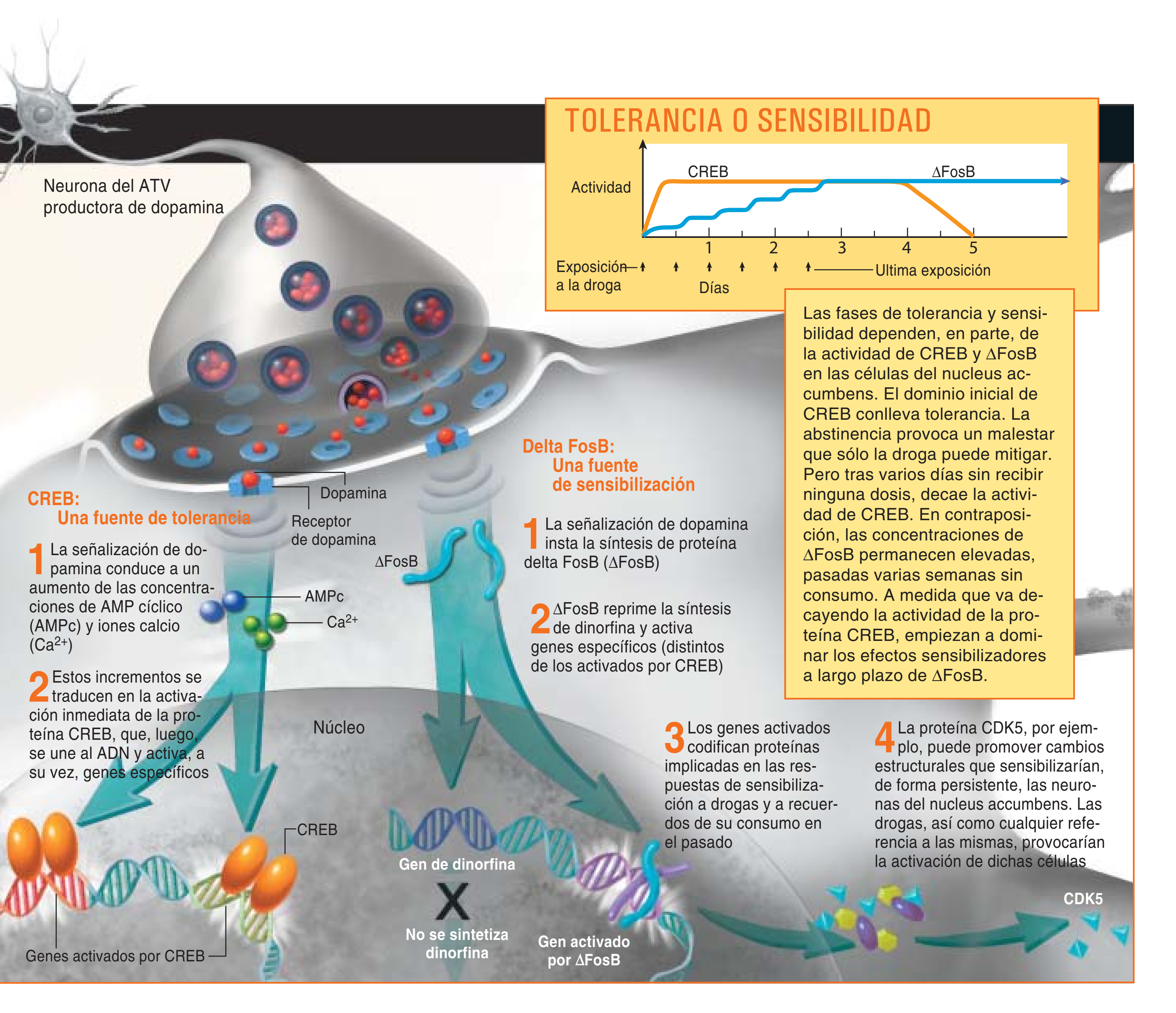

### Evaluación de la recompensa

Las vías de la recompensa poseen una larga historia evolutiva. El propio *Caenorhabditis elegans*, un gusano muy elemental, presenta una versión, rudimentaria, del sistema. En estos organismos, la inactivación de las neuronas dopaminérgicas clave, entre cuatro y ocho, provoca que pasen de largo, sin prestarle la menor atención, ante un tapiz de bacterias, su alimento favorito.

En los mamíferos, el circuito de recompensa reviste mayor complejidad. Opera con otras regiones del cerebro para conferir emotividad a una experiencia y dirigir la respuesta del individuo ante los estímulos de recompensa, incluidos el alimento, el sexo y la interacción social. La amígdala, por ejemplo, ayuda a valorar si una vivencia resulta agradable o repulsiva, si debería repetirse o evitarse; contribuye también a entablar conexiones entre una y otros indicios de referencia. El hipocampo participa en el registro de recuerdos de un hecho: dónde, cuándo y con quién ocurrió. Por fin,

## Resumen/El proceso de adicción

- La cocaína, el alcohol, los opiáceos, las anfetaminas y otras drogas que crean hábito se apropian del sistema de recompensa del cerebro. La estimulación de este circuito refuerza el comportamiento del individuo, hasta determinar que lo que uno acaba de hacer, querrá hacerlo de nuevo.
- La exposición repetida a estas drogas induce adaptaciones perdurables en el cerebro. Alteran el modo en que las neuronas del circuito de recompensa procesan la información e interaccionan entre sí.
- Entender los mecanismos en cuya virtud la exposición crónica a las drogas remodela el cerebro del adicto podría abrir vías nuevas y más eficaces para corregir las aberraciones celulares y moleculares que subyacen a la adicción.




TERESE WINSLOW

las regiones frontales de la corteza cerebral coordinan y procesan toda esta información y determinan el comportamiento ulterior del individuo. La vía ATV-accumbens, mientras tanto, "indica" a los otros centros del cerebro cuán satisfactoria es una actividad. Cuanto más nos satisfaga, tanto más probable es que el organismo la recuerde e intente repetirla.

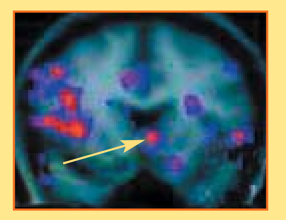
Aunque buena parte de nuestro conocimiento sobre el sistema cerebral de recompensa lo hemos adquirido a través de modelos animales, la investigación llevada a cabo en el último decenio mediante técnicas de formación de imágenes ha corroborado en el hombre la existencia de vías equivalentes relativas al control de la recompensa natural y de la mediada por drogas. El recurso a la resonancia magnética funcional o tomografía de emisión de positrones (técnicas que miden cambios de flujo sanguíneo relacionados con la actividad neuronal) nos ha permitido observar la excitación del nucleus accumbens de un cocainómano cuando se le ofrece una "raya". Si a ese mismo drogadicto se le muestra un vídeo en que aparece una persona consumiendo cocaína o una fotografía de rayas blancas sobre un espejo, su nucleus accumbens responde de forma semejante, junto con la amígdala y ciertas áreas de la corteza. Las mismas regiones se excitan en los ludópatas cuando contemplan imágenes de máquinas tragaperras, lo que sugiere que la vía ATV-accumbens desempeña también un papel crítico en adicciones no relacionadas con las drogas.

## La vía dopamínica

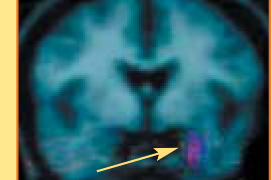
¿A qué se debe que sustancias adictivas de distinta estructura y dispar efecto ejercido insten unas respuestas similares en el circuito de recompensa del cerebro? ¿Cómo pueden la cocaína, un estimulante que acelera el ritmo cardíaco, y la heroína, un sedante analgésico, ser tan opuestas en algunos aspectos y, sin embargo, tan parecidas en la acción operada sobre el sistema de recompensa? La respuesta no es otra que la siguiente: todas las drogas de abuso, amén de cualesquiera otros efectos, provocan que el nucleus accumbens reciba una abundante cantidad de dopamina o de otras señales químicas que remedan al neurotransmisor.

Cuando una neurona del ATV se excita, transmite un mensaje eléc-

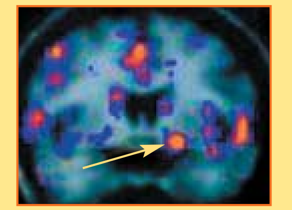
## IMAGENES DEL CEREBRO ADICTO



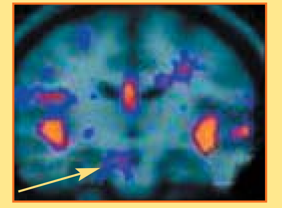
Nucleus accumbens



Amígdala



Amígdala extendida a área sublenticular

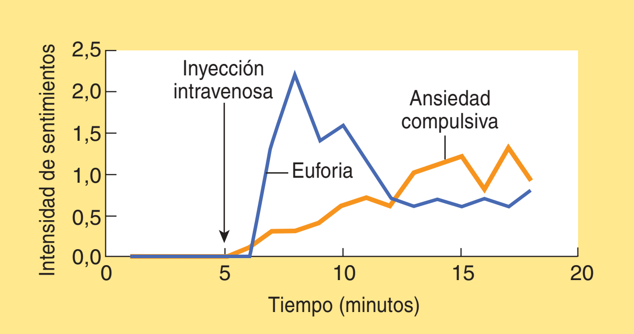


Area tegmental ventral



Corteza prefrontal

LAS MANCHAS DE COLOR que aparecen en las tomografías cerebrales de cocainómanos (*arriba*) confirman los resultados obtenidos en estudios con animales: el consumo de droga induce cambios profundos e inmediatos en la actividad de diversas zonas del cerebro. Las manchas más brillantes reflejan las alteraciones más significativas. Mientras se realizaba la tomografía, los sujetos valoraban su estado de euforia o ansiedad de droga en una escala de cero a tres. De acuerdo con los resultados, el ATV y la amígdala extendida al área sublenticular intervienen en la euforia inducida por la cocaína. La amígdala y el nucleus accumbens influyen sobre la euforia y sobre la ansiedad compulsiva de droga; la segunda aumenta con el apagamiento de la euforia (*gráfico*).




trico a lo largo de su axón, eje que se extiende hasta el nucleus accumbens. La señal en cuestión determina que se libere dopamina del extremo axónico, hiato que separa a éste del nucleus accumbens. El neurotransmisor se acopla entonces, instalado en la superficie de la neurona del accumbens, y transmite su señal a la célula. Para apagar más tarde la señal, la neurona del ATV detrae la dopamina de la hendidura sináptica y la reempaqueta para usarla en otra ocasión que convenga.

La cocaína y otros estimulantes desarman temporalmente la proteína transportadora que se encarga de devolver el neurotransmisor a las terminales de la neurona ATV; se posibilita de ese modo que el nucleus accumbens reciba un exceso de dopamina. La heroína y otros opiáceos, por su parte, se unen a las neuronas del ATV que, en condiciones normales, silencian las neuronas ATV productoras de dopamina. Al desbloquear este freno celular, se segrega en demasía dopamina en el nucleus accumbens. Los opiáceos pueden emitir también un poderoso mensaje de recompensa al actuar sin intermediarios sobre el nucleus accumbens.

Además de proporcionar esa inyección extra de dopamina, inductora de euforia y mediadora de la recompensa inicial y del refuerzo de la misma, las drogas ocasionan otras alteraciones. Con el tiempo, el circuito de recompensa se adapta al consumo repetido: el cerebro se torna adicto.

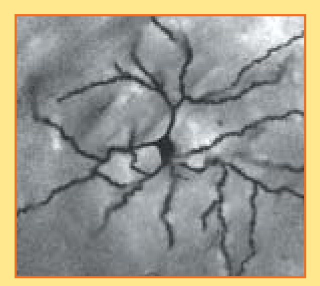
### Tolerancia y dependencia

Las etapas iniciales de la adicción se caracterizan por la tolerancia y la dependencia. Tras cierto saboreo de la droga, el adicto comienza a necesitarla en mayor cuantía para alcanzar los mismos efectos sobre el talante, la concentración, etcétera. Esta tolerancia provoca un progreso geométrico del consumo, que aboca en la dependencia. El drogadicto siente una intensa ansiedad compulsiva, un sufrimiento emocional que se convierte en físico si se le impide el acceso a la droga. Tolerancia y dependencia se deben a la anulación de ciertas partes del circuito de recompensa, lo que no deja de resultar paradójico.

En el corazón de esta cruel supresión se encuentra la proteína CREB (de "cAMP response element-binding protein"). Se trata de un factor de transcripción, una molécula que regula la expresión, o actividad, de genes y, por lo tanto, determina el comportamiento de la neurona. Cuando se consumen drogas, aumenta la concentración de dopamina en el nucleus accumbens; ello provoca que las células sensibles a la dopamina incrementen la producción de AMP cíclico (AMPc), una pequeña molécula de señalización que, a su vez, activa CREB. Entonces, esta proteína se une a un grupo específico de genes y dispara la síntesis de las proteínas determinadas por dichos genes.

El uso crónico de una droga induce la activación persistente de la proteína CREB, que potencia la expresión de sus genes diana, algunos de los cuales codifican proteínas que acallan el circuito de recompensa. Por ejemplo, CREB controla la síntesis de dinorfina, una molécula natural con propiedades opiáceas. La dinorfina se sintetiza en un subgrupo de neuronas del nucleus accumbens. Estas, en un mecanismo retroactivo, bloquean las neuronas del ATV. La acción de CREB, por tanto, termina por silenciar (mediante la producción de dinorfina) el circuito de recompensa del cerebro; induce tolerancia al tornar menos satisfactoria la cuantía previa de la dosis. El aumento de los niveles de dinorfina también contribuye a la dependencia, pues la inhibición de la vía de recompensa deja al individuo, privado del estupefaciente, deprimido e incapaz de disfrutar de experiencias que antes le resultaban placenteras.

Pero CREB constituye sólo una pieza más del engranaje. Este factor de transcripción se apaga a los pocos días de abandonar la droga. No cabe, pues, atribuir a dicha pro-





LAS MICROGRAFIAS de las neuronas del nucleus accumbens de animales expuestos a drogas no adictivas presentan las ramificaciones dendríticas con un número normal de espinas receptoras de señales (*izquierda* y *centro*). En los animales cocainómanos, brotan espinas adicionales, que confieren un aspecto de zarza a las ramificaciones (*derecha*). Posiblemente, esa remodelación aumenta la sensibilidad de las neuronas ante las señales del ATV y de otras procedencias. Ello contribuye a la sensibilidad a la droga. Hallazgos recientes sugieren que el factor delta FosB interviene en la proliferación de espinas.

teína los trastornos perdurables, las alteraciones cerebrales que hacen que el adicto vuelva a la droga, pasados incluso años o decenios de abstinencia. Esta recaída se debe, en gran medida, al fenómeno de la sensibilización, que potencia los efectos causados por la droga.

## La acción de delta FosB: sensibilización

Por contradictorio que parezca, una misma sustancia puede evocar tolerancia y sensibilización. Tras la administración de una dosis, se intensifica la actividad del factor de transcripción CREB y se impone la tolerancia: durante varios días, siente la necesidad de aumentar la dosis para realimentar el circuito de recompensa. Pero si logra abstenerse, decae la actividad de esa proteína, en cuyo momento la tolerancia deja el mando a la sensibilización, que apacigua el deseo ansioso subyacente a la búsqueda compulsiva de droga. En ese estadio, que persiste incluso durante largos períodos de abstención, un simple recuerdo o la administración de una pequeña dosis pueden provocar la recaída. Para entender las raíces de la sensibilización debemos abordar los cambios moleculares que persisten más allá de unos días. Para ello contamos con un candidato firme, el factor de transcripción delta FosB.

En el proceso de la adicción, el papel de la proteína delta FosB difiere del desarrollado por el factor CREB. De las investigaciones realizadas con ratones y ratas se desprende que, ante un abuso crónico de estupefacientes, aumentan de manera gradual y progresiva las concentraciones de delta FosB en el nucleus accumbens y otras regiones del cerebro. Por tratarse, además, de una proteína extraordinariamente estable, permanece activa en estas células nerviosas durante semanas o incluso meses después de la última dosis. Tan larga persistencia le permite mantener los cambios en la expresión de genes transcurrido mucho tiempo desde la interrupción del consumo de droga.

La investigación con ratones mutantes que sintetizan cantidades excesivas de delta FosB en el nucleus accumbens demuestra que la actividad prolongada de esta molécula induce en ellos hipersensibilidad a las drogas. Tras interrumpir la administración de droga y su posterior disponibilidad, los animales se mostraban muy propensos a la recaída. De acuerdo con este hallazgo, las concentraciones de delta FosB podrían contribuir al incremento perdurable de la sensibilidad de las vías de recompensa en el hombre. Importa señalar que la proteína delta FosB se sintetiza en el nucleus accumbens de los ratones también en respuesta a recompensas repetitivas sin vinculación con la droga; por ejemplo, un terrón de azúcar tras un ejercicio intenso en la noria. Por consiguiente, el factor de transcripción podría tener una misión más general en el desarrollo de comportamientos compulsivos asociados a un abanico amplio de estímulos con recompensa.

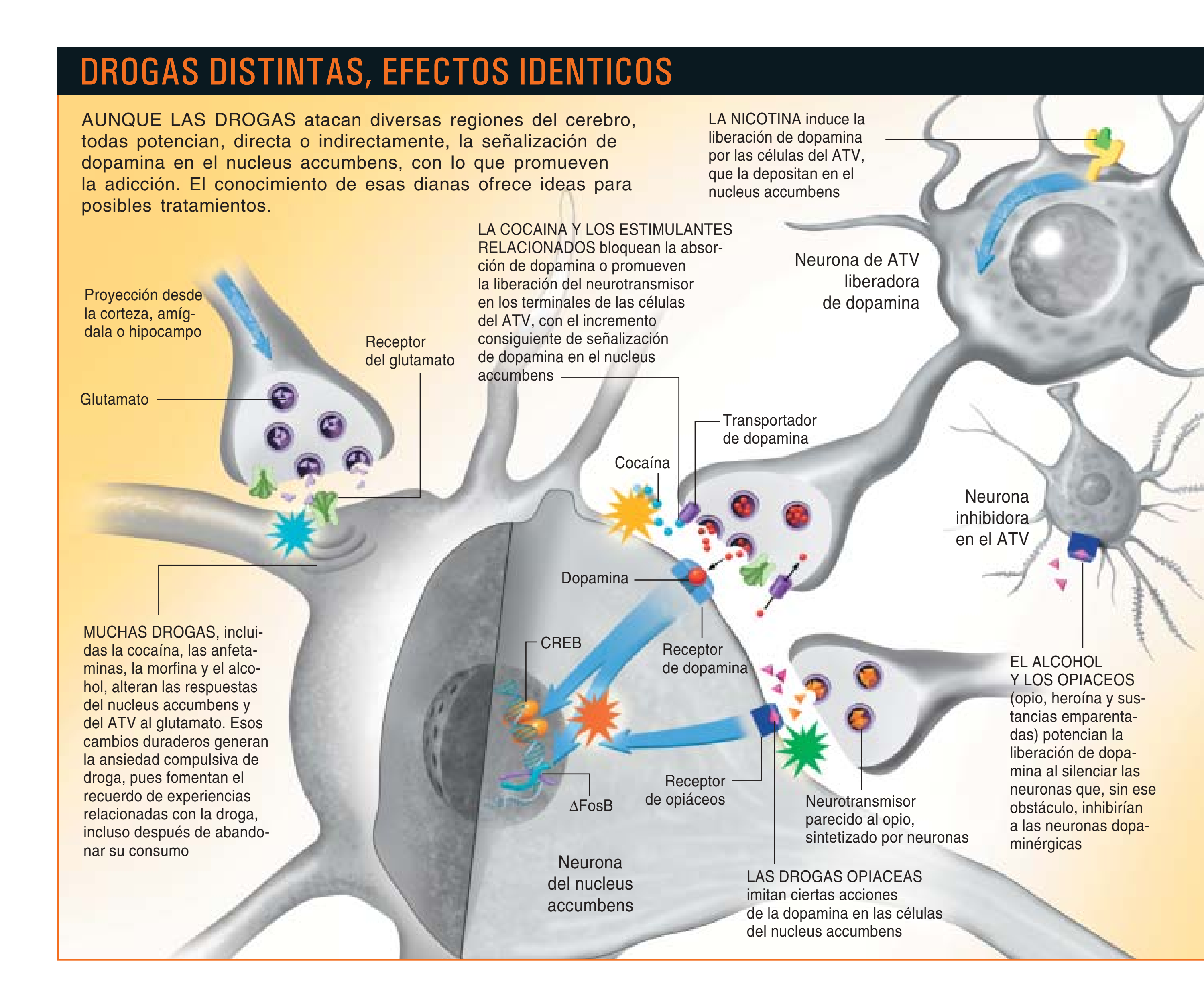
Ciertos resultados recientes apuntan hacia determinado mecanismo que explicaría la persistencia de la sensibilidad después incluso de que los niveles de la proteína delta FosB retornasen a su normalidad. La exposición crónica a la cocaína y otros estupefacientes promueve la aparición de nuevas espinas dendríticas en las neuronas del nucleus accumbens; esos botones terminales posibilitan el establecimiento de nuevas conexiones entre neuronas. En los roedores, esa producción de botones continúa en los meses subsiguientes al abandono del consumo. ¿Qué nos enseña esa observación? Sugiere, cuando menos, que el factor delta FosB podría ser responsable de la formación de las espinas adicionales. Y si nos dejamos llevar por la especulación, podríamos pensar, basados en tales resultados, que las conexiones trenzadas merced a la actividad de la proteína FosB multiplican la asociación semiótica, durante años, entre las células conectadas. Tamaño refuerzo señalizador podría explicar, tal vez, la reacción desproporcionada del cerebro ante cualquier referencia a la droga. A la postre, los cambios operados en la configuración de las dendritas constituirían la adaptación decisiva a la intransigencia de la adicción.

## La señalización del glutamato

Hasta ahora hemos centrado nuestra atención en los cambios inducidos por el abuso de drogas que se relacionan con la dopamina del sistema de recompensa del cerebro. Recuérdese, además, que la amígdala, el hipocampo y la corteza frontal intervienen también en el proceso de adicción, formando una suerte de bucle con el área tegmental ventral y el nucleus accumbens. Todas esas regiones se comunican con el sistema de recompensa mediante la liberación de glutamato, un neuro-

# DROGAS DISTINTAS, EFECTOS IDENTICOS

AUNQUE LAS DROGAS atacan diversas regiones del cerebro, todas potencian, directa o indirectamente, la señalización de dopamina en el nucleus accumbens, con lo que promueven la adicción. El conocimiento de esas dianas ofrece ideas para posibles tratamientos.

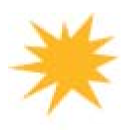



transmisor. Al promover el flujo de dopamina desde el nucleus accumbens y el ATV, las drogas alteran también, durante días, la capacidad de respuesta de esas dos estructuras cerebrales ante la concentración de glutamato. Los experimentos realizados con animales indican que los cambios de sensibilidad al glutamato en el sistema de recompensa potencian la liberación de dopamina en el ATV, así como la respuesta a la dopamina en el nucleus accumbens. Por tanto, promueven la actividad de CREB y de delta FosB, con los efectos consiguientes que ejercen tales moléculas. Más aún, parece que esta alteración de la sensibilidad al glutamato potencia las vías neuronales que vinculan el recuerdo del consumo de drogas con un intenso placer, lo que alimenta el deseo de repetir la experiencia.

Se desconoce todavía el mecanismo mediante el cual las drogas alteran la sensibilidad al glutamato en la vía de recompensa. Puede, no obstante, avanzarse una hipótesis de trabajo que se funda en la repercusión del glutamato sobre las neuronas del hipocampo. Allí, operan ciertos tipos de estímulos de corta duración que potencian una respuesta celular al glutamato durante horas. Se trata de la potenciación a largo plazo, un fenómeno que ayuda a la formación de recuerdos y, por lo que parece, viene mediado por el traslado de determinadas proteínas receptoras del glutamato desde depósitos intracelulares, donde no ejercen actividad alguna, hasta la membrana de la neurona, donde reaccionan ante el glutamato liberado en una sinapsis. Las drogas influyen sobre el transporte de estos receptores de glutamato en la vía de recompensa. A tenor de ciertas observaciones, intervendrían también en la síntesis de algunos receptores del neurotransmisor glutamato.

Considerados en su conjunto, todos los cambios que las drogas inducen en el circuito de recompensa aquí abordados promueven, en último término, la tolerancia, la dependencia, la ansiedad compulsiva, la recaída y el comportamiento complejo que caracteriza a la adicción. Pese a los puntos obscuros podemos emitir algunas afirmaciones ya seguras. Durante un largo período de consumo y poco después de abandonar la droga, predominan los cambios registrados en la concentración

## POSIBLES TRATAMIENTOS


Un hipotético agente anticocaínico podría reducir la señalización de dopamina en el nucleus accumbens. Interferiría en la capacidad de la cocaína para bloquear la absorción de dopamina en las terminaciones neuronales.


Un hipotético agente de amplio espectro anularía los efectos de la dopamina al prevenir que se acumularan las proteínas CREB o ΔFosB o se activaran sus genes diana.


Un hipotético agente de amplio espectro podría impedir los cambios que el uso crónico de drogas provoca en la señalización del glutamato del nucleus accumbens.


Los antagonistas de los opiáceos (como la naltrexona), disponibles ya en el mercado, bloquean los receptores de opiáceos. Se usan contra el alcoholismo y el tabaquismo porque el alcohol y la nicotina disparan, en el propio cerebro, la liberación de moléculas parecidas a los opiáceos.

de AMPc y en la actividad de CREB en las neuronas de la vía de recompensa. Estas alteraciones producen tolerancia y dependencia, pues reducen la sensibilidad a la droga y dejan deprimida y sin motivación a la víctima. Si esa abstinencia se prolonga, predominan los cambios en la actividad de delta FosB y en la función semiótica del glutamato. Tales acciones parecen ser las que impulsan al adicto a ir por otra dosis: por un lado, en caso de recaída aumentan la sensibilidad a los efectos de la droga; por otro, traducen en intensas respuestas el recuerdo de los momentos de euforia o cualquier referencia que los evoque.

Las investigaciones de las funciones señalizadoras de CREB, delta FosB y glutamato abordan las cuestiones centrales de la adicción, pero el proceso no acaba ahí. A medida que se vaya ahondando en el tema, irán apareciendo otras adaptaciones moleculares y celulares del circuito de recompensa y de las áreas del cerebro asociadas que habrá de arrojar luz sobre la verdadera naturaleza de la adicción.

### Terapia

Además de ofrecer una mayor comprensión de las bases biológicas de la drogadicción, el descubrimiento de estas alteraciones moleculares proporciona nuevas orientaciones para el tratamiento bioquímico de la patología. Apremia dar con nuevas terapias. Junto al evidente deterioro físico y psicológico, la adicción produce enfermedades: los alcohólicos están expuestos a cirrosis hepáticas, los fumadores a cáncer de pulmón y los drogadictos que comparten jeringuillas al contagio del sida. En términos sanitarios y de productividad, la adicción supone una sangría para todos los países. Constituye un grave problema social. Si extendemos la definición de adicción a otras formas de comportamiento patológico compulsivo, así la bulimia y la ludopatía, el coste aumenta. Las terapias que pudieran corregir las reacciones adictivas ante estímulos de recompensa proporcionarían un enorme beneficio a la sociedad.

Los tratamientos disponibles fracasan en la mayoría de los casos. Ciertos fármacos evitan que la droga llegue a su objetivo, pero no liberan al enfermo de su adicción, que sigue preso de su síndrome de abstinencia. Otros remedan los efectos de la droga; son los que calman la ansiedad del adicto el tiempo suficiente para que éste se desintoxique. Se corre el riesgo, sin embargo, de que con tales sustitutos químicos se reemplace un hábito por otro. Por último, existen tratamientos psicológicos de rehabilitación que ayudan al enfermo a controlar sus adicciones (por ejemplo, los populares programas de 12 pasos desarrollados por las asociaciones de alcohólicos anónimos), si bien una buena proporción de pacientes reincide.

Con un conocimiento más profundo de la biología de la adicción, los investigadores habrán de poder pergeñar fármacos que contrarresten o compensen los efectos a largo plazo ejercidos por las drogas sobre las regiones de recompensa del cerebro. Compuestos que interaccionen específicamente con los receptores de la dopamina o del glutamato en el nucleus accumbens, o sustancias que eviten que los factores de transcripción CREB o delta FosB actúen sobre sus genes diana, podrían a buen seguro liberar al enfermo de su adicción.

Sería muy conveniente saber identificar a las personas más proclives a la adicción. Sin restar importancia a los factores psicológicos, sociales y ambientales, la investigación acometida entre familias expuestas nos revela que, en el hombre, podría haber hasta un 50 por ciento de componente genético en el riesgo convertirse en un adicto. Aunque no se ha logrado identificar todavía los genes involucrados, si pudiéramos reconocer la propensión en una fase precoz, podríamos dirigir la intervención hacia esa población más vulnerable.

### Los autores

**Eric J. Nestler** y **Robert C. Malenka** estudian las bases moleculares de la drogadicción. Profesor y director del departamento de psiquiatría de la facultad de medicina de la Universidad de Texas en Dallas, Nestler ingresó en el Instituto de Medicina en 1998. Malenka enseña psiquiatría en la Universidad de Stanford. Anteriormente había dirigido el centro de neurobiología de la drogadicción adscrito a la Universidad de California en San Francisco.

### Bibliografía complementaria

INCENTIVE-SENSITIZATION AND ADDICTION. Terry E. Robinson y Kent C. Berridge en *Addiction*, vol. 96, n.º 1, págs. 103-114; enero de 2001.

MOLECULAR BASIS OF LONG-TERM PLASTICITY UNDERLYING ADDICTION. Eric J. Nestler en *Nature Reviews Neuroscience*, vol 2, n.º 2, págs. 119-128; febrero de 2001.

ADDICTION: FROM BIOLOGY TO DRUG POLICY. Segunda edición. A. Goldstein. Oxford University Press, 2001.

# Vientos en los planetas gigantes

**A pesar de la poca energía calorífica disponible, los planetas gigantes desarrollan intensos vientos, de hasta 1800 kilómetros por hora en Saturno. Su origen sigue siendo uno de los mayores retos para astrofísicos y meteorólogos**

Agustín Sánchez Lavega

Dos son básicamente los grupos de planetas que existen en el sistema solar. Cerca del Sol, se encuentran los terrestres: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Su radio abarca desde los 2400 kilómetros de Marte hasta los 6400 kilómetros de Venus. Se componen, sobre todo, de rocas y minerales. Presentan una densidad media en torno a los 5 gramos por centímetro cúbico. Salvo la Tierra, con sus océanos, están dotados de una corteza sólida.

Rodeando la superficie de los planetas terrestres se encuentra la atmósfera, una envoltura de gases y partículas en suspensión (aerosoles y nubes), de composición química y características físicas distintivas. Se debe tal peculiaridad a que las atmósferas de los planetas terrestres han sufrido importantes cambios en el curso de su historia.

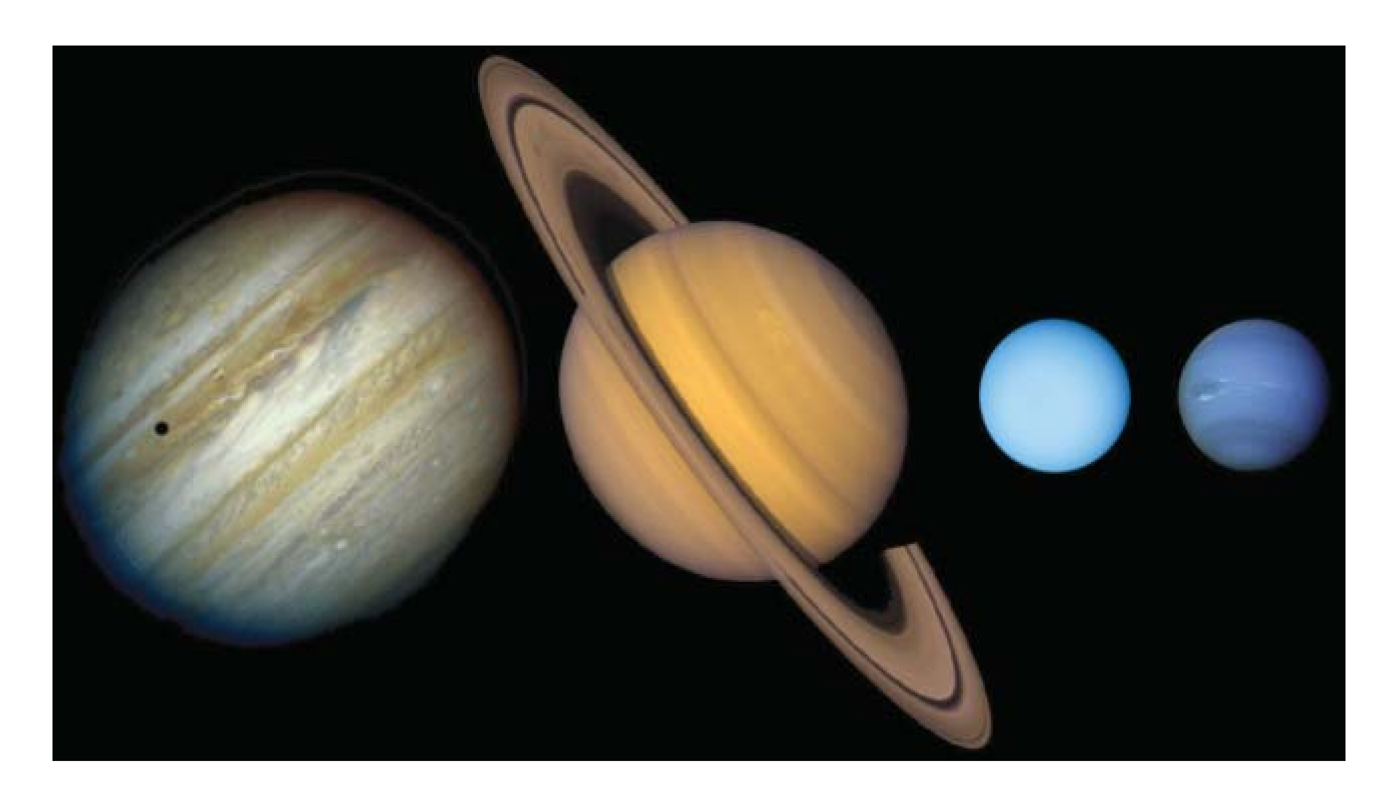
En las partes exteriores del sistema solar, allende una distancia de 750 millones de kilómetros, se encuentran Júpiter y Saturno, planetas gigantes con un radio de 70.000 y 60.000 kilómetros respectivamente; más allá aún, Urano y Neptuno, gigantes "helados" con un radio de unos 25.000 km. Los cuatro presentan una densidad media del orden de la del agua, es decir, de 1 gramo por centímetro cúbico. Carentes de un suelo rígido, constituyen unas inmensas esferas fluidas, en cuya composición predomina el hidrógeno (cerca del 90 %); el resto es helio.

Las imágenes de las naves espaciales nos muestran de Júpiter y Saturno la cima de las capas superiores de nubes y nieblas, formadas por partículas en suspensión (*véase la figura 1*). Dichas nubes se ubican en niveles de presión de entre 0,5 y 10 bares. (Suele emplearse la presión como magnitud para determinar la altura, al carecer estos planetas de superficie que sirva de referencia como punto cero.) A las temperaturas existentes a esas presiones, entre unos –150 ºC y 0 ºC, y dada la composición química de los dos gigantes, las nubes están constituidas por cristalitos de hielo de amoníaco ($NH_3$), hidrosulfuro de amonio ($NH_4SH$) y agua. En Urano y Neptuno, con temperaturas aún más bajas, de unos –210 ºC, el metano condensa y forma las nubes superiores.

## Energía interna

Los planetas gigantes se caracterizan por poseer una fuente de energía interna que calienta al planeta "desde abajo" y, en particular, su atmósfera superior. Salvo en el caso de Urano, cuya fuente interna de calor es muy débil, en el resto de los planetas esta fuente energética es del orden de magnitud de la debida a la irradiación solar absorbida por los gases y las nubes (*véase la figura 2*). Dicha fuente de energía tiene su origen en el calor generado durante la fase de formación y subsiguiente contracción planetaria.

En el caso de Júpiter, la emisión actual de energía interna se debe al enfriamiento del planeta a razón de un grado por millón de años, con una contracción consiguiente de unos tres centímetros al año. No obstante, la energía calorífica disponible allí es de sólo un trigésimo de la energía solar disponible en la atmósfera de la Tierra, es decir, apenas una decena de watts por metro cuadrado. Puesto que el flujo energético solar decrece con el inverso del cuadrado de la distancia, la irradiación que llega a los planetas helados es mucho menor. A Neptuno, que dista 4500 millones de kiló-



1. ASI APARECEN Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (*de izquierda a derecha*) en las imágenes del *Telescopio Espacial Hubble* (Júpiter) y de las naves *Voyager* (Saturno, Urano y Neptuno). Los colores de las nubes han sido intensificados.




metros del Sol, apenas le llega 1 watt por metro cuadrado.

Con tan poca energía disponible, cabría en principio esperar que los movimientos atmosféricos de escala global, es decir, la velocidad media del viento y los fenómenos meteorológicos, no fueran muy intensos. Sin embargo, las observaciones precisas, realizadas en el curso de las dos últimas décadas, de Júpiter con las naves *Voyager* 1 y 2, *Galileo* y *Cassini* y de Saturno con *Cassini*, así como el rastreo llevado a cabo por el *Telescopio Espacial Hubble* (HST) y diferentes telescopios en tierra, demuestran lo contrario.

## Circulación zonal

Siguiendo el movimiento de las pequeñas formaciones nubosas en el curso de unas horas, se observa que los vientos que las arrastran se dirigen, en los planetas gigantes, a lo largo de los paralelos, en una circulación zonal, sin apenas movimientos entre ecuador y polos, meridionales. Además, en Júpiter y Saturno los vientos se organizan de forma diferente que en Urano y Neptuno (*véase la figura 3*). En los dos primeros, los vientos alternan hacia el este y el oeste con la latitud, con unas ocho corrientes en chorro zonales por hemisferio en Júpiter y cuatro en Saturno. En el ecuador existe también una ancha e intensa corriente en chorro de más de 100 metros por segundo en Júpiter y de cerca de 500 m/s en Saturno, lo que equivale en este último planeta a unos 2/3 de la velocidad del sonido.

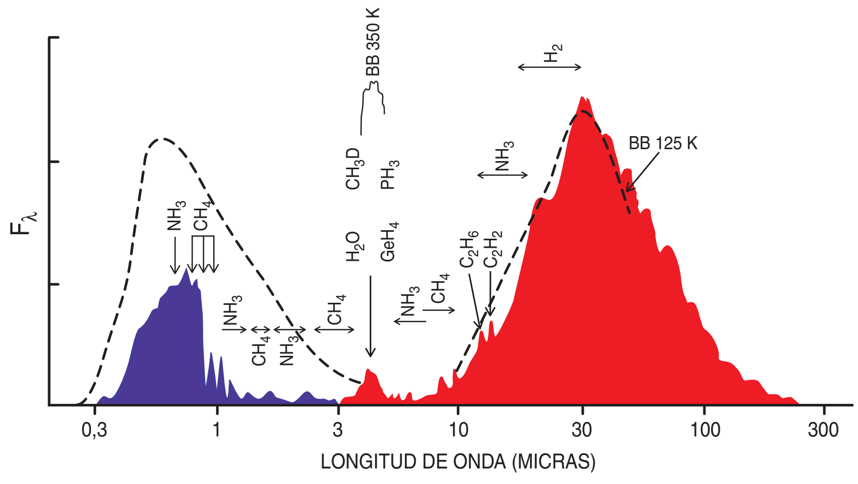
Urano y Neptuno sólo tienen una corriente hacia el este en cada hemisferio, mientras que en el ecuador la corriente se dirige hacia el oeste, con velocidades máximas de 100 m/s en Urano y 400 m/s en Neptuno. Por carecer de una superficie sólida que sirva de sistema de referencia, se miden los vientos con respecto a la velocidad angular de rotación del campo magnético del planeta, que se supone ligado a su interior y rotando con él.

La alta velocidad y peculiar organización de las corrientes de vientos en los cuatro planetas gigantes dependen, por un lado, de su estructura, que difiere de la propia de los terrestres, y, por otro, de su alta velocidad angular de rotación, con períodos de unas 10 horas para Júpiter y Saturno y 16-17 horas para Urano y Neptuno.

Siendo la circulación de los planetas gaseosos un aspecto central de la geofísica de fluidos, hemos de confesar nuestra incapacidad para explicar cómo se originan los vientos; desconocemos hasta qué profundidad se extienden, cómo se genera el intenso chorro ecuatorial hacia el este en Júpiter y Saturno y qué función desempeñan las diferentes fuentes de energía. En definitiva, ignoramos cómo opera una máquina térmica que, con tan baja energía calorífica disponible, genera, sin embargo, movimientos de tal intensidad.

## Circulación general de los planetas gigantes

Nos ceñiremos al caso de Júpiter y Saturno. A dos grupos principales se reducen los modelos propuestos para reproducir el sistema de vientos alternantes con la latitud. Ambos parten de parámetros conocidos: una geometría esférica, con un radio que decuplica el terrestre; una rápida rotación con un período 10 horas, lo que presupone intensas fuerzas de Coriolis; y una fricción escasa, sin apenas disipación de energía, al no existir una superficie o “suelo” con el que la atmósfera interaccione.




2. ESPECTRO DEL PLANETA JUPITER. Se ilustra el flujo energético en función de la longitud de onda en micrometros. A la izquierda, en azul, se muestra el espectro de reflexión de la luz solar en el visible; en trazos punteados, el correspondiente a un reflector perfecto. La diferencia entre ambas curvas constituye una medida de la energía absorbida por la atmósfera. La curva roja, a la derecha, representa la emisión infrarroja correspondiente a la energía calorífica emitida por el planeta: la absorbida en el visible y rerradiada en el infrarrojo más la energía que escapa del interior. Se corresponde bien con la de un cuerpo negro a 125 grados Kelvin, salvo en el entorno de los cinco micrometros, que es una ventana por donde escapa la radiación proveniente de niveles más profundos de la atmósfera. Se han indicado, asimismo, las moléculas de Júpiter y las correspondientes regiones del espectro en las que estas absorben la radiación visible e infrarroja.

Pero los modelos difieren en lo concerniente a la fuente de energía calorífica que domina el control de los movimientos. En los modelos de tipo "profundo", el calor interno genera los vientos; en los modelos de tipo "superficial", la insolación impulsa las masa de aire, lo mismo que en los planetas terrestres.

## Modelos profundos

Para entender las teorías agrupadas bajo ese epígrafe, es necesario conocer primero la naturaleza del interior de nuestros dos planetas gigantes. El hidrógeno se encuentra en la parte exterior, en forma de un gas molecular ($H_2$). El estado del hidrógeno molecular al nivel de las nubes superiores de amoníaco (con presiones en torno a 1 bar) es el de un gas frío con dos posibles estados cuánticos, según sea la orientación de los espines del protón del núcleo: espines paralelos (hidrógeno "orto") o espines antiparalelos (estado "para").

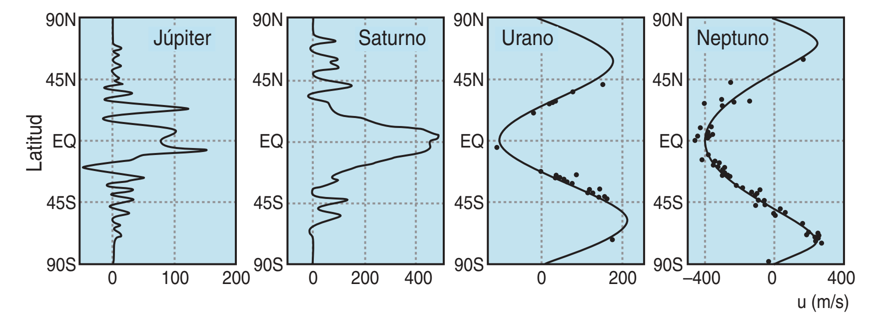
Ambos estados del hidrógeno, a las bajas temperaturas exteriores de Júpiter y Saturno, explican su comportamiento cual si se tratara de dos gases distintos; durante la transformación de uno en otro, se libera calor latente. Sería ésta una fuente adicional de energía para los movimientos que, en opinión de Peter Gierash, de la Universidad de Cornell, y Barney Conrath, de la NASA, merece considerarse.

A medida que penetramos hacia el interior planetario, las capas superiores "aplastan" con su masa a las inferiores. Aumenta la presión con la profundidad y, en consecuencia, también se eleva la temperatura (*véase la figura 4*). Entre otros, T. Guillot, del Observatorio de Niza, y William B. Hubbard, de la Universidad de Arizona, demuestran que el hidrógeno molecular se transforma gradualmente en un fluido líquido hasta que, alcanzada una presión en torno a 1 millón de bares (1 Mbar), y siendo entonces la temperatura en Júpiter de unos 6000 ºC, la presión rompe la molécula de hidrógeno y separa protones y electrones; estas partículas constituyen entonces un plasma conductor eléctrico ($H^+$). Se trata del estado metálico del hidrógeno, una fase aún inalcanzable a esas altas temperaturas en los laboratorios terrestres.

Aunque se ignora si la transición del hidrógeno molecular al metálico es gradual o brusca, lo cierto es que debe producirse, según la ecuación de estado teórica que describe el comportamiento del hidrógeno, entre 1 y 3 Mbar de presión. Acontece tal situación a una profundidad aproximadamente de 0,8 veces el radio de Júpiter y 0,6 veces el de Saturno.

Se considera, pues, como atmósfera de esos planetas la envoltura externa de hidrógeno molecular, que tiene un espesor de unos 13.000 km en Júpiter y unos 24.000 km en Saturno. La frontera que separa al hidrógeno molecular del metálico se toma como referencia para la base de la atmósfera. Además, en la capa de hidrógeno metálico se engendraría el campo magnético; allí, la rotación sería justamente la del interior planetario.

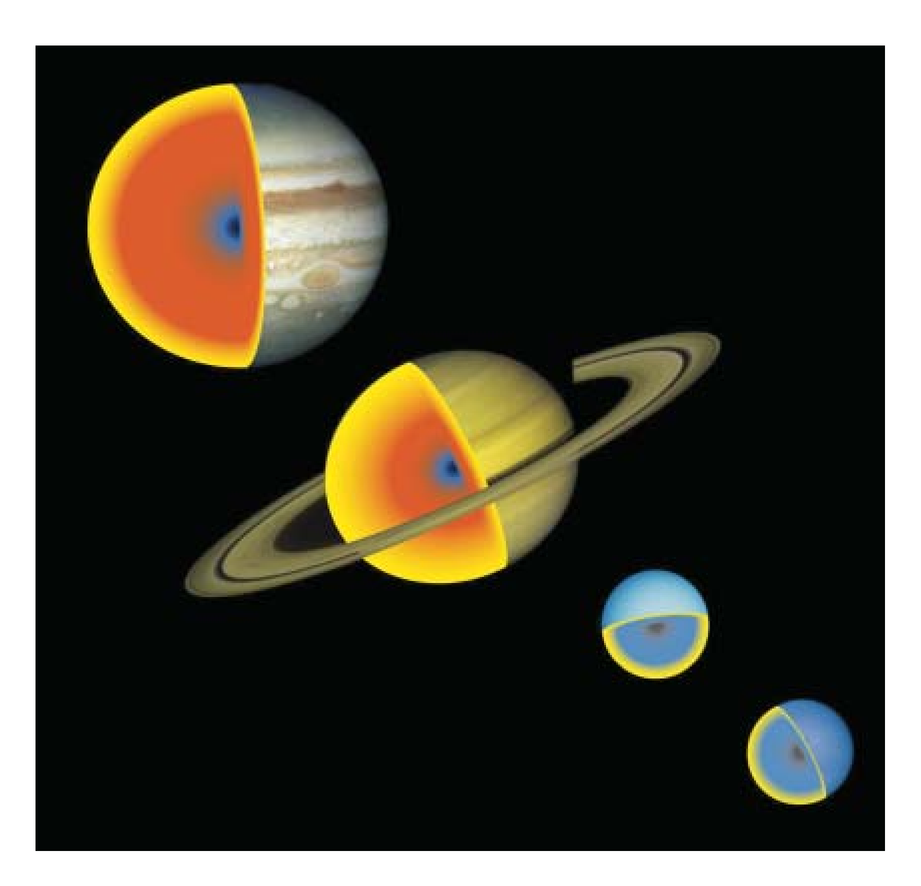
Penetrando en el interior, es posible que ambos planetas posean un núcleo diferenciado, formado por una cubierta de "hielos" sobre una




3. PERFIL DE VIENTOS ZONALES en los cuatro planetas gigantes. En el eje de ordenadas se indica la latitud en grados, desde el polo norte (90 N) al polo sur (90 S), pasando por el ecuador (EQ). En el eje de abscisas se señala la velocidad del viento zonal (positiva hacia el este, negativa hacia el oeste) en metros por segundo.



4. CORTE ESQUEMATICO del interior de Júpiter y Saturno, los planetas gigantes gaseosos, y de Urano y Neptuno, los gigantes helados. La capa exterior en color amarillo representa la atmósfera de hidrógeno molecular, en cuya cima se forman las nubes que vemos al telescopio. La capa de hidrógeno metálico en los gigantes gaseosos aparece de color rojo. La región de alta compresión de los hielos moleculares de agua y compuestos semejantes —una especie de "océano iónico"— aparece en color azul; muy extensa en Urano y Neptuno, se presupone que pueda existir en Júpiter y Saturno. El núcleo central de rocas y minerales es sólo una hipótesis, pues no hay pruebas experimentales de su existencia.



SEGUN TRISTAN GUILLOT, OBSERVATORIO DE NIZA

esfera de metales y rocas. Aún no hay demostración experimental de la presencia de este núcleo, que se presupone como un elemento necesario en los modelos que postulan la formación de planetas gigantes a partir de un embrión protoplanetario. Con una masa entre 10 y 15 veces la terrestre, esta super-Tierra habría capturado el hidrógeno de las partes frías exteriores de la nebulosa protoplanetaria, envolviéndola hasta constituir el planeta.

## Fundamento de los modelos profundos

Los modelos de circulación profunda se fundamentan en un fenómeno de convección: la fuente de energía que mueve la atmósfera es el calor interno, que se transporta por convección desde el interior hasta la atmósfera. Según diversos trabajos teóricos, iniciados por F. H. Busse, actualmente en la Universidad de Bayreuth, y otros experimentales, realizados en el laboratorio espacial *Spacelab* y otros, la organización del transporte convectivo de calor en un fluido no viscoso con geometría esférica viene determinada por la intensa rotación en un movimiento de columnas paralelas al eje de rotación del planeta.

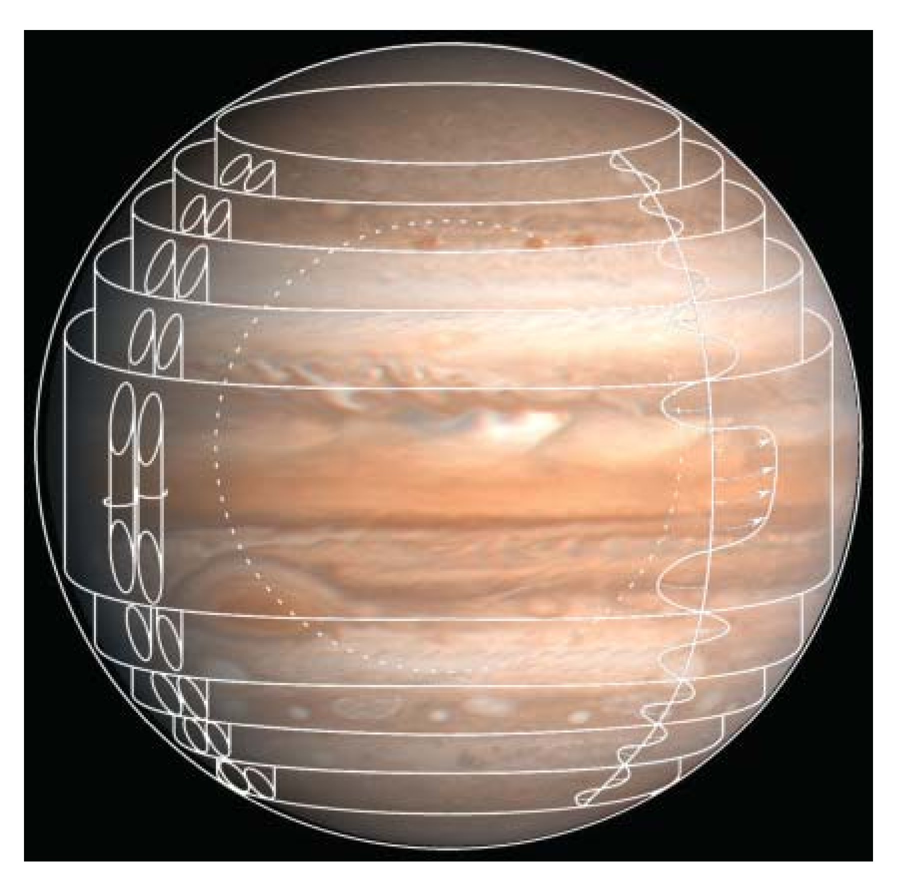
Estas columnas de Taylor-Proudman, así se llaman, engendran, a su vez, un movimiento secundario de cilindros rotantes, concéntricos con dicho eje, y alternantes en su sentido de rotación. La atmósfera molecular de hidrógeno de Júpiter y Saturno se encontraría entonces organizada como un movimiento de masas cilíndricas en rotación, limitadas interiormente por la región del hidrógeno metálico, que resultaría impenetrable. Al alcanzar los cilindros el techo superior de nubes, se engendran las corrientes zonales en chorro, alternantes hacia este y oeste, que observamos (*véase la figura 5*).

Queda aún por explorar si los movimientos convectivos pueden acoplarse al campo magnético presente en la parte superior de la región de hidrógeno metálico, en cuyo caso podrían intervenir en el movimiento de las columnas a través de fuerzas magneto-hidrodinámicas. En cualquier caso, según esta hipótesis, los movimientos se extenderían hacia el interior, que ocupan la atmósfera entera y cruzan los cilindros de un hemisferio a otro. Los vientos deberían ser muy profundos, de miles de bares, y simétricos, es decir, darse a un lado y otro del ecuador.

Adolece este planteamiento de un punto débil: si los cilindros no penetran en el interior de la capa de hidrógeno metálico, entonces el sistema de vientos zonales debería quedar confinado a las latitudes bajas de Júpiter; por una razón: la finura de su capa de hidrógeno molecular. Deberían también ser algo más extensos en latitud en Saturno. Pero no es eso lo que se aprecia. Los chorros proceden desde el ecuador hasta las regiones polares. Además, la inercia de los movimientos cilíndricos adquiriría entonces tal magnitud, que los vientos apenas deberían presentar cambios en el tiempo.

Ambos parámetros —profundidad y longevidad de los vientos— guardan cierta conformidad con las medidas de la sonda Galileo, que penetró en Júpiter en diciembre de 1995 y encontró vientos crecientes en profundidad, hasta unos 25 bares, instante en el cual la sonda se destruyó. Sin embargo, la peculiar meteorología de la región sondeada, un "área caliente", de Júpiter cercana al ecuador, no permite una afirmación apodíctica y generalizar el resultado al resto del planeta.

La hipótesis concordaría también con las medidas, tomadas en el curso de más de un siglo, de las velocidades de los vientos zonales en la atmósfera de Júpiter; dichos regis-



5. EN EL INTERIOR DE JUPITER Y SATURNO, el calor retenido desde la formación de los mismos se transporta por convección hacia el exterior. Debido a la geometría esférica de ambos planetas y a su alta velocidad angular de rotación, la convección organiza los movimientos atmosféricos en la capa de hidrógeno molecular en columnas de Taylor-Proudman, concéntricas con el eje de rotación, que atraviesan cada planeta de un hemisferio a otro. Estas columnas engendran una circulación secundaria en forma de cilindros concéntricos rotantes, cuyo sentido alterna de fuera hacia dentro. Cuando las columnas tocan la cima de las nubes, su movimiento se manifiesta como un conjunto de corrientes en chorro dirigidas a lo largo de los paralelos.

tros avalan la estabilidad de los mismos a largo plazo. Hay que hacer notar, sin embargo, la existencia de algunos cambios menores, aunque significativos, en los vientos de este planeta, sobre todo en la corriente más intensa localizada en la latitud 23º norte. La corriente, que alcanza velocidades de 180 metros por segundo, fue detectada a lo largo de la segunda mitad de la década de los noventa por E. García Melendo, del Observatorio-Fundación E. Durán, y por el autor de este artículo usando imágenes del *Hubble*. Pero, ¿qué decir de Saturno? ¿Son también inmutables los vientos de Saturno? Sobre este aspecto hablaremos mas adelante.

## Modelos superficiales

Este grupo de modelos postula que la insolación, o radiación solar absorbida en la atmósfera superior, controla los vientos zonales, sin que la fuente interna desempeñe función alguna. En síntesis, las corrientes zonales se desarrollarían sobre una capa delgada, de sólo un centenar de kilómetros aproximadamente. El comportamiento dinámico de la atmósfera sería el mismo que rige el de la atmósfera terrestre: también, las ecuaciones del movimiento, sólo que parametrizadas en las condiciones de la atmósfera de un planeta gigante: se cambia el radio del planeta, la composición química de la atmósfera, la velocidad angular de rotación y otros.

Las simulaciones de ordenador que viene realizando desde hace más de veinte años Gareth P. Williams, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos-NOAA de la Universidad de Princeton, muestran cómo se generan las bandas paralelas al ecuador, los vórtices ubicados entre ellas y un perfil de vientos con corrientes alternantes hacia el este y el oeste, que recuerdan a los de Júpiter (*véase la figura 6*). Estas estructuras emergen a partir de un mecanismo de "turbulencia cuasigeostrófica".

En un planeta en rotación rápida, cuya capa meteorológica presenta un espesor mucho menor que el radio, las diferencias de temperatura entre ecuador y polos generan movimientos turbulentos de pequeña escala. Estos remolinos acaban mezclándose para formar estructuras giratorias casi bidimensionales; es decir, su tamaño horizontal es mucho mayor que el vertical. Los vórtices originados transmitirían el movimiento a las corrientes zonales.

Los modelos superficiales adolecen de un inconveniente: la incapacidad para reproducir la intensa corriente ecuatorial hacia el este que se observa en Júpiter y Saturno. Lo que es peor, predicen en principio movimientos ecuatoriales hacia el oeste. Para reproducir la corriente ecuatorial hacia el este, nos veríamos obligados a introducir hipótesis muy forzadas.

Pero la limitación fundamental de este tipo de modelos estriba en su marginación de la fuente interna de calor. ¿Cómo se desacoplan entonces los movimientos convectivos en las capas inferiores generados por la fuente de calor interna de los de la capa superior calentada por el Sol? Se exigiría algún proceso que fuera capaz de poner una frontera inferior y restringir la capa superficial delgada de los movimientos. Ello nos exigiría conocer la profundidad de penetración de la radiación solar y cuánta energía, solar e interna, es absorbida por las capas superiores de nubes. También habría que averiguar cuánto calor latente puede liberarse durante la condensación de las nubes superiores, al formarse tormentas masivas por convección húmeda, como las observadas en Júpiter y Saturno.

AGUSTIN SANCHEZ LAVEGA

En unión con Santiago Pérez Hoyos hemos emprendido un estudio para cuantificar la estructura vertical de las nieblas y nubes superiores de Saturno, así como su variabilidad a largo plazo. Abordamos también el efecto ejercido en el planeta por la deposición de energía solar. Con Ricardo Hueso estamos elaborando modelos convectivos de las tormentas de agua y amoníaco, que se desarrollan en el ecuador y en las latitudes medias del planeta —piénsese en las Grandes Manchas Blancas (*véase la figura 7*)—, para así controlar la cantidad de energía y movimiento que desencadenan. Nos interesa conocer, además, de qué modo la energía y el movimiento afectan a los vientos zonales. A partir de los resultados a que lleguemos, esperamos poder domeñar los aspectos determinantes de la circulación zonal de vientos.

## Cambios en los vientos

De los modelos profundos se distinguen los modelos superficiales en una cuestión crucial: la posible presencia de cambios temporales. En los modelos profundos, al ser la fuente de energía interna constante en el tiempo, no habría cambios significativos, quizá no más de un 10 % en la intensidad y localización de las corrientes de vientos.

Sin embargo, los modelos de insolación sobre capa delgada deberían ser sensibles a los cambios en la irradiación solar. Saturno constituye, en este sentido, un buen caso de estudio, pues el planeta se halla sometido a una intensa variabilidad en la insolación de naturaleza por una parte estacional, ya que su eje de rotación se halla inclinado 27º respecto del plano de la eclíptica; su excentricidad orbital es la mayor de todos los planetas gigantes, mayor incluso que la terrestre.

Además, la región ecuatorial de Saturno se encuentra sometida a los cambios cíclicos producidos cuando la sombra de los anillos se proyecta sobre la atmósfera. Aunque en mucha menor medida, depende también de la luz que reflejan dichos cambios sobre el planeta y de la radiación térmica que, en forma de radiación infrarroja, emiten los anillos hacia el planeta. Estos cambios no serían en cualquier caso instantáneos, a diferencia de lo que acontece en la Tierra.

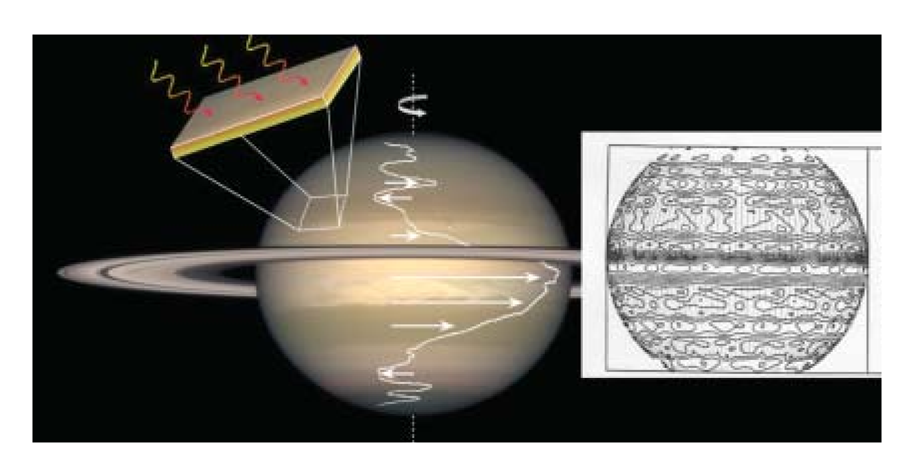
Debido a las bajas temperaturas que reinan en Saturno y a su composición química de hidrógeno, la constante de tiempo radiativa de la atmósfera —tiempo que tardan las masas atmosféricas en calentarse o enfriarse— es mucho más larga que en la Tierra; esa morosidad produce desfases de unos años entre las épocas de máxima insolación y subsiguientemente de máxima temperatura en una misma latitud. Con todo, hay pruebas, desde hace muchos años, de cambios estacionales por encima de las nubes de amoníaco en el campo de temperaturas de Saturno. ¿Repercutirán estos cambios térmicos en el sistema de vientos?

Hasta la llegada a Saturno de las naves espaciales *Voyage*r 1 en 1980 y *Voyage*r 2 en 1981, los datos acerca de las nubes del planeta y de sus movimientos eran escasos. Sólo durante las erupciones de las Grandes Manchas Blancas y cuando algunos pequeños detalles aparecían en el disco, se habían podido medir los vientos. Desde las observaciones de William Herschel, en 1793, apenas una veintena de detalles habían podido emplearse para tal fin.

Merced a las imágenes de alta resolución de las *Voyager*, pudimos medir con precisión el movimiento de más de 2000 trazadores nubosos. Los datos históricos guardan una buena correlación con los aportados por las sonda espaciales, según pude demostrar junto con José Félix Rojas, de nuestro equipo, y con Pedro V. Sada, de la Universidad de Monterrey. Sin embargo, el exiguo número de puntos históricos en el perfil de vientos, y su dispersión en latitud, impedían un análisis riguroso de los cambios de la circulación eólica a largo plazo en Saturno.

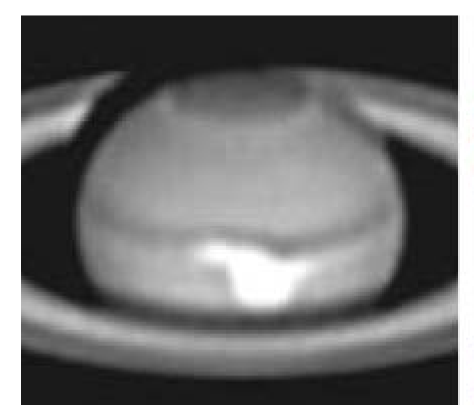
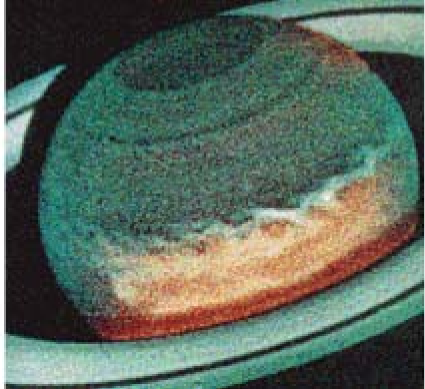
Para abordar este aspecto, emprendimos en 1990 un estudio sistemático de las formaciones nubosas y de sus movimientos. En un principio nos servimos de telescopios terrestres, en particular el telescopio planetario del Observatorio del Pic-du-Midi, contando con la colaboración de Jean Lecacheux y François Colas. Más tarde, entre 1994 y 1995, acudimos a las imágenes de archivo del *Hubble*; desde 1996 nos hemos valido de las imágenes del *Hubble* obtenidas en colaboración con Richard French, del Colegio Wellesley. Así hemos logrado un seguimiento sistemático del movimiento de cerca de 350 detalles nubosos y determinado sus velocidades.

En la figura 8 mostramos el perfil de velocidad de los vientos com-



6. DE ACUERDO CON LOS MODELOS "SUPERFICIALES", la dinámica atmosférica en un planeta gigante está regida por la deposición del calor solar en una capa delgada de la atmósfera superior. Aquí se representa, a la izquierda, para el caso de Saturno, sobre el que se ha superpuesto el perfil de velocidad de los vientos. Lo mismo que en la Tierra, las diferencias de temperatura entre ecuador y polos, unida a la alta velocidad angular de rotación de los planetas gigantes, generan movimientos organizados en un sistema de corrientes zonales: corrientes en chorro a lo largo de los paralelos. A la derecha se presenta una simulación numérica de estas corrientes para el caso de Júpiter, según Gareth P. Williams.

RICARDO HUESO; GARETH P. WILLIAMS (*Simulación por ordenador de la derecha*)


7. RARA VEZ SE PUEDE OBSERVAR una "Gran Mancha Blanca" sobre Saturno. De su presencia existe registro histórico de los años 1876, 1903, 1933, 1960 y 1990. A la izquierda se muestra la imagen de la Gran Mancha ecuatorial de 1990, poco después de su aparición (cuando su tamaño alcanzaba unos 20.000 km) en imagen tomada desde el Observatorio del Pic-du-Midi. En el centro se ofrece la evolución de la mancha al cabo de un mes, tras comenzar su dispersión por los vientos del planeta, en imagen del *Hubble*. En 1994 surgió otra perturbación ecuatorial que aquí se muestra en imagen del *Hubble* (*a la derecha*). Según los modelos realizados por nuestro equipo, las grandes manchas blancas se forman cuando las masas de gas caliente y húmedo ascienden con velocidades superiores a los 150 metros por segundo desde unos 175 kilómetros de profundidad en la atmósfera, formando tormentas de agua y amoníaco, que se muestran visibles cuando estos compuestos se condensan y generan nubes blancas de cristalitos de hielo.

AGUSTIN SANCHEZ LAVEGA

parado con el de la época de las naves *Voyager*. Resulta oportuno subrayar algunos hechos destacados. En primer lugar, confirmamos la existencia de una nueva corriente polar de 100 metros por segundo, cerca del polo sur, descubierta por nuestro grupo un par de años antes; en virtud de la misma, los chorros guardan una notable simetría con respecto al ecuador. En segundo lugar, los chorros no ecuatoriales parecen no haber sufrido ningún cambio entre ambos períodos de tiempo, separados por unos quince años, es decir, medio año de Saturno. Por último, el resultado más interesante sin duda, es la "caída" de más de 200 metros por segundo entre las latitudes 20º norte y sur de la corriente ecuatorial.

## Tres posibilidades

La pregunta resulta obvia: ¿cuál es el origen de este corte en el perfil del chorro ecuatorial? Existen varias posibilidades, unas imputables a efectos indirectos y otras a un cambio real en el perfil. La primera, una resolución insuficiente del telescopio espacial, que no percibiera la presencia de otros pequeños detalles que se movieran con las velocidades encontradas en las imágenes de las sondas *Voyager*. Aunque así fuera, habría que explicar por qué que existen vientos que arrastren con mayor lentitud esos detalles atmosféricos.

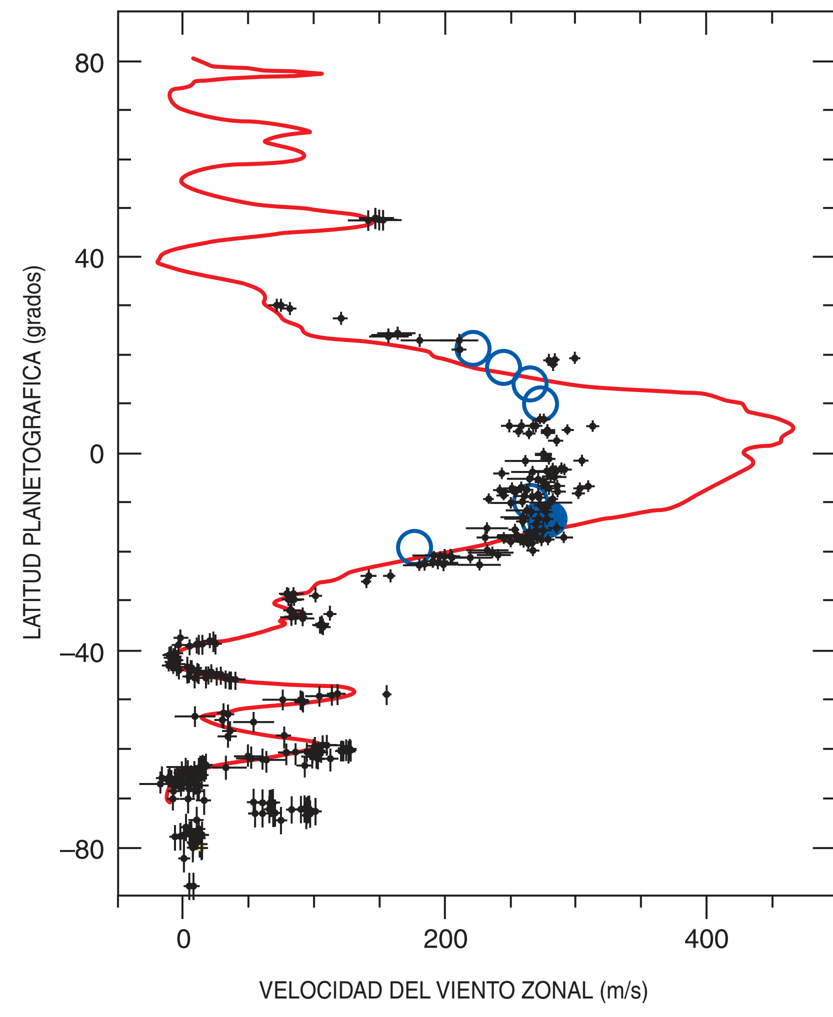
De acuerdo con una segunda posibilidad, los detalles en cuestión ocuparían una latitud más elevada que en la época de los viajes de los *Voyager* y seguirían la ley observada en otras regiones del planeta, según la cual los vientos decrecen con la altura por encima de la cima de las nubes. A partir del estudio de la reflexividad de las nubes, hemos determinado que las formaciones nubosas entre 1994 y 2002 se encontraban unos 35 km más altas que en 1980-81. Con todo, se trataría de una circunstancia extraña, pues una caída tan brusca en una distancia vertical corta conllevaría diferencias de temperatura de más de 60 grados entre latitudes cercanas, lo que no parece viable.

Cabe una tercera posibilidad: que el movimiento que vemos corresponda al de una onda ecuatorial en la atmósfera y no la del fluido atmosférico; es decir, que corresponda al viento. La onda se movería con una velocidad de fase de 200 m/s hacia el oeste con respecto del chorro ecuatorial; esa celeridad coincidiría con el valor de la caída observada en la velocidad del viento. La idea de la onda se basa en que algunas de las formaciones nubosas utilizadas como trazadores del viento en el ecuador están separadas regularmente en longitud, a la manera de crestas o valles de una onda. Los datos que poseemos no permiten, sin embargo, una conclusión incontrovertida.

Existe, por el contrario, la posibilidad de que el chorro ecuatorial haya cambiado su velocidad. El cambio podría deberse a las variaciones estacionales de insolación que sufre la región ecuatorial de Saturno o a la dinámica desarrollada por las grandes tormentas, verbigracia, una Gran Mancha Blanca.

En septiembre de 1990, estalló una gran tormenta en el ecuador de Saturno (*véase la figura 7*). Sus efectos se extendieron por el ecuador del planeta y duraron a lo largo de 1991. Para nuestra sorpresa, en 1994 se formó otra mancha ecuatorial poderosa, algo más al sur que la primera. Desde entonces, el ecuador no ha cesado de mostrarnos estructuras nubosas irregulares, a veces grandes, a veces pequeñas, con mayor o menor contraste.

Si las tormentas son la razón del cambio en el viento ecuatorial, nos hallaríamos ante vientos sensibles a la dinámica que se desarrollara en las capas superiores de nubes. Las tormentas podrían extraer energía del movimiento zonal atmosférico, frenándolo. Otra opción sería que las nubes altas de las tormentas actuaran como fuentes locales




8. COMPARACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DE LOS VIENTOS en Saturno. Se indica el valor medio para 1980-81 a partir de las imágenes de las naves *Voyager* (*línea roja*) en cotejo con las medidas individuales para el período 1994-2002 efectuadas sobre imágenes obtenidas con el *Hubble* (*puntos negros*), y a partir de las imágenes con telescopios en tierra (*círculos azules*).

SEGUN A. SANCHEZ LAVEGA *ET AL.*, EN *NATURE*, 5 JUNIO 2003

de opacidad a la radiación solar y al escape de la radiación interna, generando importantes diferencias térmicas entre áreas adyacentes que modificaran el régimen de vientos.

## Dinámica profunda

Desde el punto de vista general de la circulación de los planetas gigantes, sospechamos que la constancia, casi global durante más de 100 años, en el sistema de vientos de Júpiter, y en los no ecuatoriales de Saturno, responde a una dinámica profunda en la atmósfera.

Sin embargo, cuando acontece algún fenómeno atmosférico de gran intensidad, las corrientes zonales pueden sufrir variaciones en su velocidad, moduladas por dicha dinámica. Ocurre así en las grandes tormentas de Saturno y en las perturbaciones del intenso chorro a 23 grados norte de Júpiter. Quedaría por saber qué función desempeña la radiación solar en la generación de estas formaciones meteorológicas gigantescas.

A mediados de 2004, la nave *Cassini*, resultado de un proyecto conjunto de la Agencia Espacial Norteamericana NASA y de la europea ESA, entrará en órbita alrededor de Saturno. Por unos cuantos años se convertirá en la mayor fuente de conocimiento sobre los planetas gigantes del sistema solar. Esperemos que entonces muchas de estas incógnitas puedan ir despejándose con las observaciones que aporte.

Al propio tiempo, habrá que profundizar en el desarrollo de modelos numéricos de circulación general para los planetas gigantes, que nos permitan contrastar las simulaciones de cómo se generan los vientos, con las observaciones existentes y con las proporcionadas por *Cassini*.

Ni que decir tiene que todo avance en el conocimiento de los mecanismos que controlan la circulación general de las atmósferas planetarias va a repercutir en una mejora de nuestros modelos para explicar los movimientos atmosféricos y oceánicos de nuestro propio planeta; en particular, en su capacidad predictiva a largo plazo. Además, los modelos de circulación atmosférica ideados para los planetas gigantes se convertirán en referencia para interpretar las futuras observaciones de los planetas gigantes extrasolares que se vienen descubriendo desde 1995.

## El autor

**Agustín Sánchez Lavega** es catedrático de física aplicada en la Escuela Superior de Ingenieros en Bilbao de la Universidad del País Vasco. Desde 1980 viene estudiando la física de los planetas gigantes, tema sobre el que ha publicado más de un centenar de artículos. Su interés actual se extiende a los planetas extrasolares. Participa en la preparación de la misión *Venus-Express* de la Agencia Espacial Europea, que volará a este planeta en el año 2005.

## Bibliografía complementaria

DYNAMICS OF JOVIAN ATMOSPHERES. T. E. Dowling en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 27, págs. 293-334; 1995.

ATMOSPHERES OF THE GIANT PLANETS. A. P. Ingersoll en *The New Solar System*, dirigido por J. K. Beatty, C. C. Petersen, A. Chaikin. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

A STRONG DECREASE IN SATURN'S EQUATORIAL CHORRO AT CLOUD LEVEL. A. Sánchez Lavega, S. Pérez Hoyos, J. F. Rojas, R. Hueso, R. G. French en *Nature*, vol. 423, págs. 623-625; 2003.

# La Tierra tiembla en silencio

No todos los seísmos van acompañados de un gran estruendo.
Ciertos temblores silenciosos presagian tsunamis o terremotos devastadores

Peter Cervelli

A principios de noviembre de 2000, la Gran Isla de Hawai sufrió la mayor conmoción sísmica de los últimos diez años. Se hundieron en el mar unos 2000 kilómetros cúbicos del flanco sur del volcán Kilauea, liberando la energía de un seísmo de 5,7. Parte del desplome se produjo en una zona que frecuentan a diario miles de personas para contemplar un espectacular río de lava. Pese a todo, nadie advirtió el temblor, ni siquiera los sismólogos.

¿Cómo pudo pasar inadvertido un suceso de tal magnitud? Sólo ahora sabemos que no todos los movimientos sísmicos se acompañan de grandes estruendos. En el Kilauea se dio uno de los ejemplos más claros de terremotos silenciosos, un tipo de movimiento de tierras desconocido por la ciencia hasta hace pocos años. Por supuesto, el autor nunca hubiese detectado este seísmo de no ser por la red de sensores que utilizaba el Observatorio Volcánico de Hawai del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos para el seguimiento de la actividad del volcán. Cuando observé que el flanco sur del Kilauea se había desplazado 10 centímetros a lo largo de una falla subterránea, vi también que había tardado unas 36 horas en recorrer esa distancia, un paso de tortuga tratándose de un terremoto. En un temblor típico, un lado de la falla se adelanta al otro a velocidad supersónica, en cuestión de segundos, celeridad suficiente para crear las ondas sísmicas que sacuden con estruendo el terreno.

Pese a su lentitud y silencio, mis colaboradores y yo nos dimos cuenta en seguida de que el temblor del Kilauea podía presagiar un desastre. Si esa enorme masa de rocas y detritus ganaba cantidad de movimiento y se convertía en un ingente corrimiento de tierras —separándose del resto del volcán y deslizándose veloz hacia el mar— las consecuencias serían devastadoras. El hundimiento del material levantaría olas gigantescas (tsunamis) que inundarían las ciudades ribereñas de la costa del Pacífico. Esos desplomes catastróficos de los flancos constituyen una amenaza potencial para muchas islas volcánicas.

## Movimientos súbitos e intermitentes

Pero el descubrimiento de los terremotos silenciosos abre una puerta a la esperanza. Las probabilidades de que una ladera sufra un derrumbamiento de este calibre son escasas y los instrumentos que registran los temblores silenciosos permiten avisar a tiempo. Además, la identificación de las condiciones que podrían provocar deslizamientos sigilosos sugiere estrategias audaces para prevenir catástrofes de este tipo. También

**EL GIGANTESCO DESPLOME** de una ladera entera provocado por un seísmo silencioso (*arriba, a la izquierda*) podría generar un pavoroso tsunami de cientos de metros de altura (*abajo*).

DAVID FIERSTEIN



se están detectando temblores “mudos” en lugares donde no existe probabilidad de desprendimientos. La información que allí se obtiene de tales temblores permite afinar las predicciones sobre los que se evidencian en superficie.

El descubrimiento de los terremotos sigilosos y su relación con el desplome de laderas llegó a raíz de los estudios realizados en torno a otros desastres naturales potenciales. Seísmos devastadores y volcanes, en particular, constituyen una preocupante amenaza para Japón y la costa noroeste del Pacífico de EE.UU., zonas de subducción de placas tectónicas, es decir, de progresivo hundimiento de una bajo otra. Por este motivo, a principios de los años noventa del siglo pasado, se comenzaron a tender extensas redes de receptores del sistema de posicionamiento global (GPS) en esas regiones y en la falda del Kilauea y otros volcanes activos. A partir de las señales que reciben de una constelación de más de 30 satélites de navegación, estos instrumentos miden en todo momento su propia posición sobre la superficie del planeta con una precisión de escasos milímetros.

Se esperaba que estos GPS permitiesen apreciar el deslizamiento, lento e incesante, de las placas tectónicas de la corteza terrestre, así como los movimientos relativamente rápidos provocados por los seísmos y la actividad de los volcanes. Resultó una sorpresa observar que en ocasiones los instrumentos detectaban ligeros desplazamientos del terreno que no obedecían ni a un terremoto ni a una erupción conocidos. Trasladados a un mapa, dibujaban un trazado muy similar al que caracteriza el movimiento de una falla. Con otras palabras, todas las estaciones GPS situadas a un lado de la falla se desplazaban varios centímetros en la misma dirección. No habría que extrañarse si el trazado se hubiese obtenido a lo largo de un año, por lo menos, pues entonces podría atribuirse al deslizamiento de una falla, un proceso lento y continuo. Pero los movimientos reflejados —varios centímetros por día— eran cientos de veces más rápidos. Además de su relativa celeridad, estos fenómenos compartían con los terremotos corrientes su intermitencia: sucesos discretos que aparecen y desaparecen súbitamente. En ello se distinguían también del deslizamiento de falla.

Su aparición repentina en las laderas de una isla volcánica crea el temor de un posible desprendimiento catastrófico. La mayoría de los terremotos se originan a lo largo de fallas, que por sí mismas frenan los deslizamientos: el movimiento se detiene con la liberación de la tensión entre dos franjas de tierra que intentan sobrepasarse una a otra. Pero si la gravedad se convierte en la principal fuerza motriz, la actividad quizá no se suspenda. En la peor de las situaciones, la sección del volcán suprayacente a la falla se vuelve tan inestable que, iniciado el deslizamiento, su propio peso arrastra hacia abajo toda la falda de la montaña hasta que termina, disgregada, en el fondo oceánico.

## Resumen/Pendiente deslizante

- No todos los seísmos van acompañados de un gran estruendo. En ocasiones, la tierra tiembla en silencio. Este nuevo tipo de terremotos sigilosos obliga a replantear nuestros conocimientos sobre el comportamiento de las fallas proclives a lo seísmos.
- En casos excepcionales, el temblor silencioso de las laderas de un volcán costero puede desencadenar ingentes avalanchas en cascada que se precipitan al mar y provocan tsunamis de notable altura.
- En zonas de falla creadas por la subducción de una placa bajo otra, los temblores silenciosos promueven la aparición de conmociones sísmicas en el terreno.
- En otros lugares, los deslizamientos sigilosos podrían laborar contra el desencadenamiento de un terremoto violento, porque relajan las tensiones a lo largo de las fallas, que, sin ese freno, provocarían la sacudida.

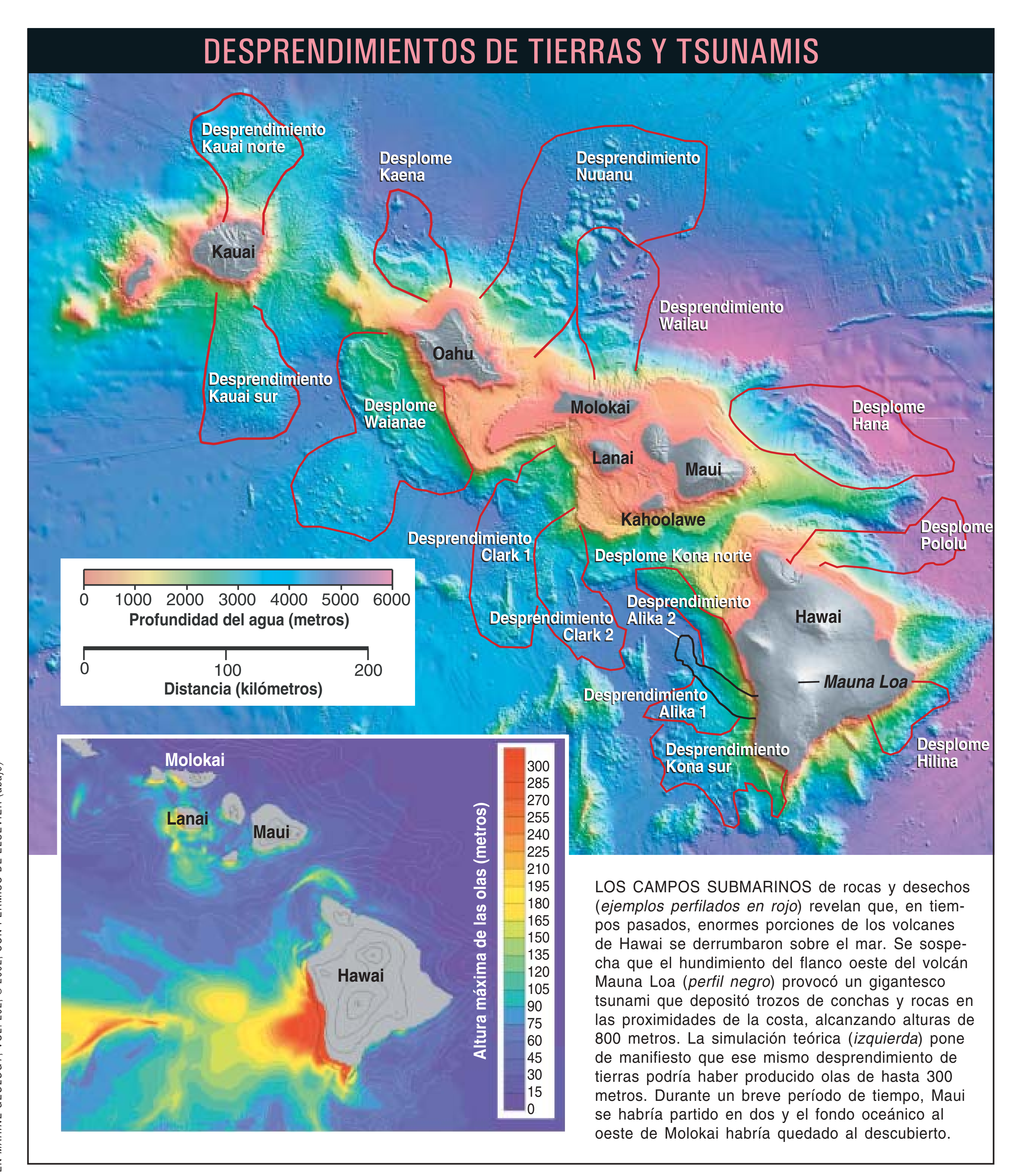
Las laderas escarpadas del Kilauea y otros volcanes semejantes se tornan más propensas a este tipo de hundimientos cuando la lava de erupciones sucesivas se va acumulando sin dar tiempo a su evacuación (puesto que su erosión resulta demasiado lenta). El temblor silencioso detectado en el Kilauea induce a sospechar que la vertiente sur del volcán seguirá ese camino, tal vez hacia su destrucción final.

Por ahora, el rozamiento a lo largo de la falla actúa de freno de emergencia. Pero la gravedad venció en ocasiones anteriores. Así lo muestran las grandes extensiones de desechos que las imágenes de sónar han registrado de las profundidades que circundan islas volcánicas de todo el mundo, como la de Mallorca en el Mediterráneo o las Canarias en el Atlántico. En las islas Hawai se han encontrado rastros de más de 25 derrumbamientos acaecidos en los últimos cinco millones de años, un instante en la escala temporal de la geología.

En un desprendimiento típico caen al mar masas cientos de veces mayores que la porción del monte Santa Elena que se desgajó durante la erupción de 1980, más que suficiente para desencadenar colosales tsunamis. En la isla hawaiana de Lanai, sin ir más lejos, se han descubierto rastros de la acción de las olas: por ejemplo, abundantes fragmentos de conchas marinas a 325 metros de altura. Gary M. McMurtry y sus compañeros de la Universidad de Hawai en Manoa, defienden la hipótesis de que dichas conchas habrían sido arrastradas por las olas de un tsunami que alcanzase la asombrosa elevación de 300 metros en algunas costas de la isla. En tiempos modernos apenas se han registrado olas que superen la décima parte de esa altura.

### Métodos de prevención

Por aterrador que parezca tal fenómeno, el riesgo debe valorarse en el contexto adecuado. En una escala de tiempo humana, la probabilidad del desplome de una ladera volcánica resulta mínima, aunque mucho mayor que la del impacto de un gran cometa o asteroide en la Tierra. En las islas Hawai se producen desprendimientos de magnitud suficiente




LOS CAMPOS SUBMARINOS de rocas y desechos (*ejemplos perfilados en rojo*) revelan que, en tiempos pasados, enormes porciones de los volcanes de Hawai se derrumbaron sobre el mar. Se sospecha que el hundimiento del flanco oeste del volcán Mauna Loa (*perfil negro*) provocó un gigantesco tsunami que depositó trozos de conchas y rocas en las proximidades de la costa, alcanzando alturas de 800 metros. La simulación teórica (*izquierda*) pone de manifiesto que ese mismo desprendimiento de tierras podría haber producido olas de hasta 300 metros. Durante un breve período de tiempo, Maui se habría partido en dos y el fondo oceánico al oeste de Molokai habría quedado al descubierto.



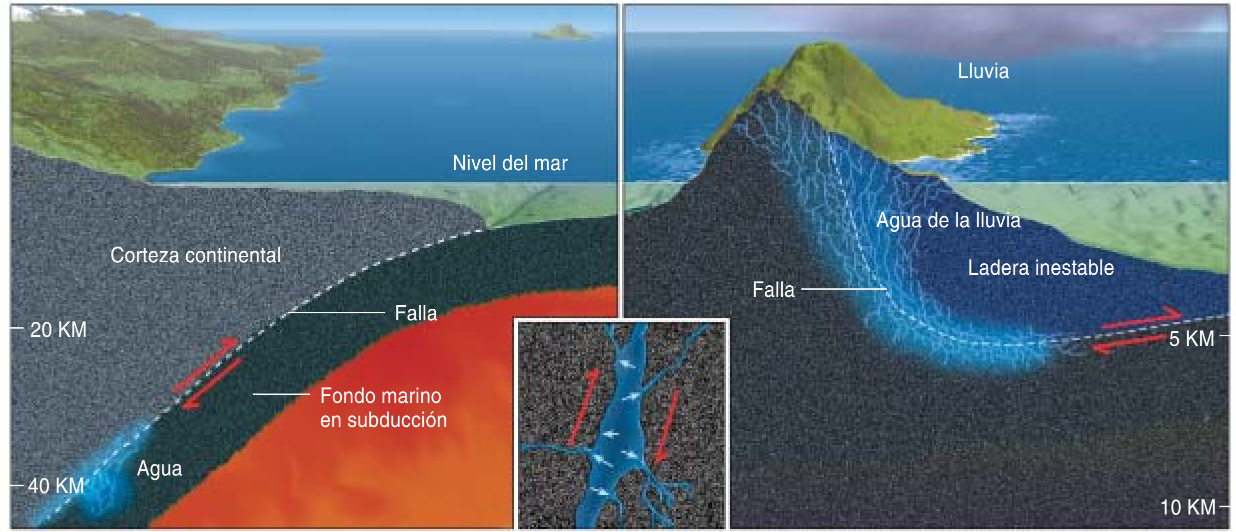
para originar tsunamis sólo una vez cada 100.000 años. Ciertos expertos cifran en uno por 10.000 años la frecuencia de estos fenómenos en todo el mundo. Pese a todo, la terrible destrucción que conllevan justifica la adopción de medidas preventivas.

Con miras a detectar deformaciones en islas volcánicas inestables, se están empezando a instalar redes de receptores GPS, permanentemente activos, en la isla Reunión (océano Indico), en la isla Fogo (archipiélago de Cabo Verde) y en todo el archipiélago de las Galápagos, entre otras. La red del Kilauea, con más de 20 estaciones GPS, ha revelado ya que el volcán sufre temblores paulatinos y sigilosos a la par que seísmos intensos y destructores. Sin embargo, algunos científicos señalan que, en estos momentos, el Kilauea puede estar protegido de un terrible derrumbamiento debido a los montones de lodo y roca —probablemente restos de antiguos desplomes— que

## MECANISMO DE LOS TERREMOTOS SILENCIOSOS

LA INFILTRACION DEL AGUA puede provocar temblores silenciosos si se abre camino hasta una falla vulnerable. El propio peso de la roca ejerce una fuerte presión sobre el agua infiltrada, que termina por separar los dos flancos de la falla (*inserto*); así facilita el que uno se deslice sobre el otro (*flechas en rojo*). Este tipo de deslizamiento silencioso ocurre en las zonas de subducción y en las islas volcánicas.

**ZONA DE SUBDUCCION** **ISLA VOLCANICA**




El agua extruida de los minerales hidratados en una lengua de fondo marino antiguo puede penetrar en las fallas que se originan cuando ese segmento se desliza bajo otra placa tectónica.

**FALLA llena de agua**

El agua de la lluvia puede filtrarse desde la superficie terrestre hasta fallas poco profundas, como las que separan una ladera inestable del resto de un volcán.

DAVID FIERSTEIN

apuntalan su ladera sur. Los nuevos descubrimientos sobre el proceso de deslizamiento del Kilauea podrían generalizarse a otros volcanes de la isla que quizá carezcan de estructuras de sostén similares.

Sean cuales fueren las particularidades de una isla, la transición de un deslizamiento silencioso al hundimiento abrupto comportaría una aceleración repentina de la ladera móvil. En el peor de los casos, esta aceleración alcanzará enseguida velocidades vertiginosas, sin dar tiempo a una detección precoz del fenómeno. En el caso más favorable, la aceleración procederá por espasmos y originará una cascada de seísmos silenciosos, que lentamente se convertirán en terremotos regulares hasta desembocar en un cataclismo final. Una red permanente de GPS detectaría fácilmente esta aceleración intermitente mucho antes de iniciarse las sacudidas sísmicas. Incluso podría avisar de un tsunami con antelación suficiente.

Pese a todo, si el desplome alcanzara determinada magnitud, conocerlo con horas e incluso días de antelación no serviría de mucho, dadas las dificultades que entraña la evacuación de ciudades y pueblos enteros. Cabe preguntarse entonces qué medidas preventivas podrían tomarse. Una de las opciones se basaría en afianzar las laderas inestables de los volcanes oceánicos. Sin embargo, aunque se trata de un problema técnicamente resoluble, en la práctica exigiría un esfuerzo inmenso. Otra estrategia consistiría en extraer, de la parte superior de la falda del volcán, una masa rocosa suficiente para que el peso que empuja el sistema hacia el derrumbamiento desapareciera, al menos por algunos miles de siglos. Por fin, existe también otra vía, mucho más económica aunque llena de incertidumbres geológicas y riesgos: consistiría en rebajar lentamente una ladera inestable mediante una serie de pequeños seísmos. En este caso, los expertos utilizarían, como instrumento controlado para prevenir el desplome, la misma fuerza que ahora puede estar creando los temblores silenciosos en el Kilauea.

Nueve días antes del último temblor silencioso del Kilauea, una lluvia torrencial vertió en el volcán cerca de un metro de agua en menos de 36 horas. Desde hace tiempo, los geólogos saben que la filtración de agua en las fallas puede provocar terremotos. Nueve días viene a ser el tiempo estimado para que el agua penetre, a través de las grietas y poros de la roca basáltica fracturada, hasta cinco kilómetros de profundidad, donde se produjo el temblor silencioso. Nuestro grupo sospecha que la presión ejercida por la roca sobre el agua de lluvia infiltrada forzó la separación de los costados de la falla y posibilitó el avance de uno sobre otro.

Este descubrimiento respalda la validez de una propuesta controvertida: inyectar a presión agua o vapor en las fallas situadas bajo una ladera inestable para provocar pequeños seísmos que relajen la tensión, necesarios para un descenso lento. Este tipo de deslizamientos inducidos constituye un proceso habitual, a muy pequeña escala, en centrales geotérmicas y otras insta-

laciones en las que se bombea agua hacia la tierra. En el caso de los volcanes, sin embargo, la dificultad extrema estriba en colocar la cantidad de fluido apropiada en el lugar correcto, para impedir que se produzca justamente el hundimiento que se desea evitar. Algunos geofísicos vieron en esa estrategia una forma de relajar la tensión que soporta la infausta falla californiana de San Andrés. Pero abandonaron la idea ante el temor de crear más problemas de los que pretendía resolver.

## Cuñas de agua

Además de llamar la atención sobre el fenómeno del desplome catastrófico de una ladera volcánica, el descubrimiento de los seísmos silenciosos obliga a replantearnos varios aspectos relativos al movimiento de las fallas, entre ellos la evaluación de los riesgos sísmicos. En la costa del noroeste de los EE.UU. se han observado numerosos temblores de ese tipo a lo largo de la enorme zona de falla de Cascadia, entre la placa Norteamericana y la placa Juan de Fuca, en subducción. Esos temblores silentes se caracterizan por la notable regularidad de su aparición, hasta el punto de poder predecirse su recurrencia.

Muy posiblemente, la explicación de tal predictibilidad se encuentra en la acción del agua que fluye por debajo de las zonas de subducción, que controla en buena medida el momento y el lugar en que se produce un deslizamiento silencioso de las fallas. En su movimiento de subducción, la placa se hunde tierra adentro. Encuentra así temperaturas y presiones cada vez más elevadas, que liberan abundante agua atrapada en los minerales depositados allí. Cuando esta bolsa de fluido se abre paso hacia el exterior, pueden producirse temblores silenciosos: el flujo ensanchará la zona de falla y quizá favorezca un lento deslizamiento.

Por si fuera poco, Garry Rogers y Herb Dragert, del Servicio de Inspección Geológica de Canadá, informaron en junio de 2003 que estos temblores silenciosos podrían servir incluso de precursores de algunos de los violentos terremotos que sacuden la región. Al producirse en las profundidades y a intervalos discretos, los deslizamientos lentos regulan la tasa de acumulación de tensión en la parte superficial de la falla, que avanza por espasmos. En este segmento superficial, bloqueado, de la falla, suele tardarse años, siglos tal vez, en acumular la tensión requerida para desencadenar un fuerte seísmo. Sin embargo, Rogers y Dragert sugieren que un deslizamiento sigiloso podría acelerar el proceso, aumentando el riesgo de un terremoto normal a las pocas semanas o meses de haberse detectado uno silencioso.

También en otras partes del mundo se están replanteando las predicciones sísmicas a raíz del descubrimiento de los temblores silenciosos. Se cree que ciertas regiones de Japón, próximas a las llamadas "lagunas sísmicas" —zonas donde los terremotos normales son menos frecuentes de lo que cabría esperar, tratándose de regiones de notoria actividad sísmica—, corren un serio peligro de convulsiones destructoras. Pero si la tensión se ha ido relajando en el deslizamiento parsimonioso de las fallas, sin que nadie lo advirtiera, el peligro real puede ser bastante menor de lo esperado. De modo análogo, cuando se descubre un deslizamiento así a lo largo de fallas consideradas hasta el momento inactivas, será preciso atender a tales estructuras para determinar si pueden desarrollar seísmos violentos.

Si se comprobara en el futuro que los terremotos silenciosos constituyen un rasgo común de la mayoría de las grandes fallas, habría que revisar teorías ya muy asentadas sobre el origen de los movimientos sísmicos. La gran heterogeneidad que presentan las velocidades de deslizamiento de las fallas plantea un reto a quienes abordan estos procesos mediante leyes físicas fundamentales. Se admite, por ejemplo, que el número y la intensidad de los terremotos obedecen una sencilla ley de rozamiento. ¿Explicaría ésta también los temblores silenciosos? No tenemos una respuesta convincente.

La investigación sobre los seísmos silenciosos apenas acaba de empezar. Son fenómenos sutiles que aportan una comprensión más cabal de las causas y mecanismos de los deslizamientos de las fallas. Nunca se insistirá bastante en la importancia de este análisis, puesto que un deslizamiento rápido provocará daños enormes, incluso en puntos muy alejados de su origen. La realidad de los seísmos silenciosos nos ofrece una nueva perspectiva sobre el proceso de deslizamiento, al permitir una investigación pormenorizada de las zonas de falla en cada etapa del movimiento de la misma.

## El autor

**Peter Cervelli,** geofísico doctorado por la Universidad de Stanford, investiga en el Observatorio Volcánico de Hawai, adscrito al Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos. Desde este centro, asentado en el borde del cráter Kilauea, dirige un estudio sobre la deformación de la corteza terrestre: mediante una red de casi cincuenta GPS, mide los declives, las tensiones y los movimientos débiles que se producen en los dos volcanes más activos de la isla: el Mauna Loa y el Kilauea.

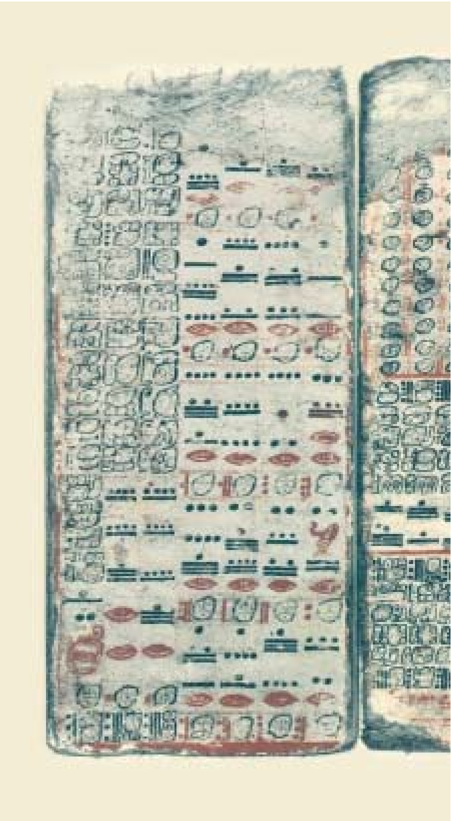
## Bibliografía complementaria

SUDDEN ASEISMIC FAULT SLIP ON THE SOUTH FLANK OF KILAUEA VOLCANO, HAWAII. Peter Cervelli, Paul Segall, Kaj Johnson, Michael Lisowski y Asta Miklius en *Nature*, vol. 415, págs. 1014-1017; 28 de febrero, 2002.

EPISODIC TREMOR AND SLIP ON THE CASCADIA SUBDUCTION ZONE: THE CHATTER OF SILENT SLIP. Garry Rogers y Herb Dragert en *Science*, vol. 300, págs. 1942-1943; 20 de junio, 2003.

GIANT LANDSLIDES, MEGA-TSUNAMIS, AND PALEO-SEA LEVEL IN THE HAWAIIAN ISLANDS. G. M. McMurtry, P. Watts, G. J. Fryer, J. R. Smith y F. Imamura en *Marine Geology*, vol. 203, págs. 219-233; 2004.

# El enigma del calendario maya



**El códice de Dresde podría enseñarnos la forma de concordar el calendario maya con el nuestro**

Andreas Fuls

Los conquistadores españoles no sólo se trajeron a Europa sacos llenos de oro y plata. También vinieron con un manuscrito iluminado de los mayas del Yucatán. Hoy se conserva como una auténtica joya en la Biblioteca regional de Sajonia, en la ciudad de Dresde. Este "Codex Dresdensis" apareció en Viena en el año 1739 y fue adquirido por el entonces director de la Biblioteca Real de Sajonia, Johann Christian Götze.

Para que se pudiesen examinar con mayor facilidad las 39 hojas de papel de corteza escritas por las dos caras de que se componía el manuscrito, Ernst W. Förstemann, director de la biblioteca, publicó en 1880 un facsímil, obtenido por medio del nuevo procedimiento de la heliografía. El mismo, como lingüista, fue de los primeros en ocuparse científicamente de este manuscrito maya único y en analizar las cifras y fechas calendáricas que contenía.

La cultura maya se desarrolló a partir del siglo I o II a.C. en una zona que abarca la actual península mexicana de Yucatán, así como parte de Belice, Guatemala El Salvador y Honduras (*véase la figura 4*). A lo largo de los siglos surgieron centros políticos independientes, con pirámides, templos, palacios, estelas, altares y canchas de juego de pelota. En la cúspide de la sociedad de cada centro estaba un soberano, que llevaba el título de *ahaw* (Señor o Príncipe); desempeñaba funciones políticas y religiosas. La relación entre política, religión, visión del mundo, calendario y astronomía era muy estrecha; no es de extrañar que muchas construcciones estuviesen orientadas hacia fenómenos astronómicos periódicos. En las ciudades de Tikal y de Uaxactún hay líneas de mira entre los templos que señalan el orto solar en los equinoccios de primavera y de otoño.

## Sólo cuatro manuscritos mayas

Los mayas anotaron sus observaciones astronómicas en numerosos libros, que confeccionaban con pliegos de papel de corteza de árbol. Dado que el material era perecedero, continuamente se iban escribiendo duplicados. Los descubridores españoles hablaron de la existencia de casas de libros, en las cuales, como en las actuales bibliotecas, estaban depositados los manuscritos. Según ellos, eran testimonios de supersticiones peligrosas y debían ser quemados. Sólo cuatro códices mayas se salvaron. Tres de ellos reciben el nombre de sus actuales lugares de depósito: Dresde, París y Madrid. El cuarto, el códice Grolier, no se descubrió hasta el siglo XX; debe su nombre al Club Grolier de Nueva York, donde se expuso por primera vez.

Hoy en día se puede descifrar y leer casi por completo la peculiar escritura jeroglífica de los mayas, pero hace cien años, cuando se empezaba a estudiarla, sólo se conocían los signos del calendario y del sistema numérico. Los mayas contaban con el sistema vigesimal, es decir, de veinte en veinte, y como conocían el cero y utilizaban un sistema de valores de posición, podían hacer cálculos con cantidades grandísimas. Las tablas astronómicas del códice de Dresde contienen fechas y cálculos sobre Venus, Marte, la Luna, el Sol, algunas estrellas y eclipses solares. Por ello, representa la fuente más importante de la astronomía maya.

Förstemann había comprendido ya que las tablas de las páginas 24 y de la 46 a la 50 indican los momentos en que Venus resulta visible y en los que no (*véase la figura 1*). Los sacerdotes mayas sabían que el planeta que unas veces veían como Estrella de la Tarde en el oeste del cielo y otras como Estrella de



1. EL CODICE DE DRESDE es la fuente más importante de la astronomía maya. La Tabla de Venus de este manuscrito iluminado proporciona la visibilidad de Venus como "Estrella matutina" y "Estrella de la tarde". Una página (*a la izquierda de la foto*) contiene tablas de corrección; las otras cinco describen respectivamente un ciclo de visibilidad —una órbita sinódica— de Venus en el cielo.

ERNST W. FÖRSTEMANN, ADAPTADO POR ANDREAS FULS

la Mañana en el este ocupa cada 584 días la misma posición en el firmamento con respecto al Sol; por ejemplo, la posición extrema en el este con respecto al disco solar. El vocabulario moderno llama a este período "tiempo sinódico de revolución de Venus". Cinco órbitas celestes de Venus duran 2920 días, exactamente el óctuplo de un año solar de 365 días.

## El sistema cíclico del calendario

En cada una de las cinco páginas de la tabla de Venus, se describe una órbita del planeta junto con los datos correspondientes en el calendario solar de 365 días, el Haab. Para hacer coincidir la tabla de Venus con el Tzolk'in, calendario religioso de 260 días, se alargó la tabla hasta 65 órbitas de Venus. Después de este lapso de tiempo de 37.960 días, el ciclo de Venus coincidía de nuevo con ambos ciclos calendáricos y la tabla podía comenzar de nuevo (37.960 = 65 × × 584 = 104 × 365 = 146 × 260).

De todos modos, el ciclo medio de Venus no dura exactamente 584 días, sino que es 0,08 días más corto. Por ello, en períodos largos variaban las fechas contenidas en las tablas de Venus.

Para no tener que cambiar las fechas del Tzolk'in, los mayas recurrieron a un truco genial: buscaron un período de tiempo que fuera un múltiplo de 260 días y al mismo tiempo unos días más corto que un múltiplo de los 584 días que dura el período redondeado de la revolución sinódica de Venus. Estos períodos corregidos están anotados en el códice de Dresde para poder hacer el cómputo desde la fecha de comienzo de la tabla de Venus. (Que en la notación habitual se escribe 9.9.9.16.0, 1 Ahaw 18 K'ayab, donde las cifras corresponden a la representación en el llamado cómputo largo, en el cual los días se cuentan sucesivamente mediante un sistema vigesimal; la otra parte indica la fecha tal y como viene dada en el calendario Haab/Tzolk'in.)

Aneja a la tabla de Venus encontramos en el códice de Dresde una tabla de eclipses, cuyas 69 fechas concuerdan con los intervalos en que era posible un eclipse de Sol (*véase la figura 2*). La verdad es que los mayas no podían calcular con antelación si se observaría realmente un eclipse solar en su territorio. Pero sí sabían que sólo podía haber uno cada seis meses y cuando la luna nueva se hallaba suficientemente cerca de uno de los dos nodos lunares, es decir, de los puntos de intersección de la órbita lunar y la órbita solar (la eclíptica). Dado que seis meses sinódicos, o lunares (177,18 días), son algo más largos que el medio año eclíptico (173,31 días) tras el cual el alineamiento del Sol con los nodos lunares se repite, había que introducir de tiempo en tiempo un intervalo entre posibles eclipses más breve, de cinco meses.

Se resaltan en la tabla estos intervalos más breves mediante figuras que representan la muerte de la joven diosa Luna o al dios de la muerte, o con el típico glifo de los eclipses —medio iluminado, medio oscuro, con el símbolo del Sol en el centro—. La aparición de este glifo en otras inscripciones induce a pensar que simbolizaba el paso del Sol de la zona de la vida a la de la oscuridad y de la muerte (*véase la figura 3*).

Los investigadores de la cultura maya descubrieron también el mismo



2. LA TABLA DE ECLIPSES del códice de Dresde describe 69 ciclos de eclipses. Abarca, por consiguiente, 11.960 días, unos 33 años. Las figuras (glifos) con representaciones de dioses se insertan tras unos intervalos más breves, de cinco meses, que sirven de ajuste calendárico.

ERNST W. FÖRSTEMANN, ADAPTADO POR ANDREAS FULS

sistema de calendario del códice de Dresde en inscripciones esculpidas en diversos monumentos megalíticos. Förstmann comprobó que los mayas utilizaban un cómputo continuo de los días; hoy lo llamamos "cómputo largo". Los mayas podían, gracias a esta medida del tiempo, establecer el día exacto de los diferentes sucesos y fenómenos celestes: como fecha inicial única se tomaba la última creación mitológica del mundo.

## La cronología estándar

Pero, ¿con qué fecha del calendario cristiano coincidía la fecha inicial del cómputo largo? Esta fue una de las más interesantes preguntas que se hicieron los investigadores de la cultura maya; de una respuesta fiable dependía además la datación de dicha civilización.

Joseph Goodman (1838–1917), periodista y empresario, fue el primero que, fijando la fecha de inicio del cómputo largo en el calendario cristiano, situó la historia maya en un marco temporal absoluto. Comparando crónicas españolas y del Yucatán de los siglos XVI al XVIII con el calendario maya, estableció en 1905 el 3 de septiembre de 3114 a.C. como fecha inicial del cómputo largo (todas las fechas anteriores a 1582 se darán conforme al calendario juliano).

El astrónomo mexicano Juan Martínez desplazó en 1926 esta correlación un día. En 1927, el inglés J. Eric S. Thompson corrigió finalmente otros cuatro días, resultando la fecha de 8 de septiembre de 3114 a.C., a fin de adaptar la edad de la luna —el número de días transcurridos desde la última luna nueva— a las series lunares descifradas entre tanto; habían sido descubiertas en diversas estelas.

Se considera este 8 de septiembre de 3114 a.C. —conocido generalmente como Correlación GMT, según las iniciales de los tres investigadores— como fecha inicial del cómputo largo. Se ha utilizado hasta hoy como cronología estándar.

Entre esta cuenta de los días y la cuenta juliana que el holandés Joseph Justus Escalígero (1540-1609) introdujo con fines astronómicos y que suma los días transcurridos desde el 1 de enero de 4713 a.C., resulta una diferencia de 584.285 días. Esta cifra recibe el nombre de "constante de correlación" entre el cómputo largo y nuestro moderno sistema de calendario.

## El período clásico de la cultura maya

Con la cronología estándar se pueden convertir las fechas del cómputo largo, encontradas en diversas inscripciones mayas, en las correspondientes de nuestro calendario moderno. El período clásico de la cultura maya se situaría en un intervalo temporal que iría desde el año 300 d.C. hasta el 830, aproximadamente, y el posclásico, entre el 1100 y la llegada de los españoles. Los seguidores de la cronología estándar dan por sentado que entre el período clásico y el dominio español no hubo ninguna reforma del calendario.

Sin embargo, no es de descartar que las hubiese a consecuencia de los cambios radicales que, sin duda, ocurrieron en la sociedad y en la cultura. También cabe dentro de lo imaginable que hubiera fallos de correspondencia en los documentos de los siglos XVI al XVIII. En cualquier caso, estas fuentes del período colonial se contradicen parcialmente, en lapsos de algunos días o incluso de años. La correlación GMT se basa únicamente en la *Relación* del obispo Diego de Landa, escrita hacia el 1566, y en la única página conservada de la *Crónica* de Oxcutzab, del año 1685.

Hubo que abordar luego la concordancia de las fuentes coloniales con los datos del período clásico.


## Resumen/La cronología maya

- Los mayas utilizaron un complicado sistema de calendario, con tres ciclos interconectados, que unían fenómenos astronómicos e ideas religiosas.
- No se ha resuelto de manera concluyente la correspondencia entre las fechas del calendario maya y el cómputo moderno del tiempo. Se ha establecido una cronología maya estándar, pero presenta muchas discrepancias con los fenómenos periódicos más conocidos de los cuerpos celestes.
- Un análisis de las fechas que aparecen en el códice de Dresde y en diversas inscripciones proporcionó una correlación entre el calendario maya y el moderno que se aparta de la cronología estándar unos 208 años. Según esto, la Epoca Clásica maya se retrasaría del siglo IX al siglo XI d.C.

Así, cuando Thompson ajustó la correlación GMT a la edad lunar, hubo de introducir una desviación con respecto a las fuentes coloniales. Por ello publicó en 1950 dos correlaciones diferentes, la GMT para la época clásica y la GMT2 para la época colonial, modificada en dos días. Fundamentó esta alteración en un cambio del modo de computar los días.

## ¿Cuál es la constante de correlación válida?

Pero la contradicción es aún mayor. Cuando el arqueólogo norteamericano Sylvanus G. Morley interpretó la *Crónica* de Oxcutzcab, colocó todos los inicios de año al final del año precedente, aunque la *Crónica* da para cada fecha del Tzolk'in su correspondiente primer día de Haab como comienzo del año. Sin la aceptación tácita de su interpretación errónea, Thompson hubiera podido mantener una correlación con 364 días más, es decir, una constante de correlación de 584.649. Este valor no se adaptaría a la tabla de Venus del códice de Dresde (346 días de desviación) ni tampoco a las inscripciones en que se da la edad de la luna (9 días de variación).

Los arqueoastrónomos manifiestan sus dudas acerca de la cronología estándar, ya que con ella sólo la mitad de las fechas de eclipses recogidas en el códice de Dresde coinciden con alguna fecha en que realmente pudo observarse en algún lugar del mundo un eclipse de Sol. La cronología estándar tampoco proporciona ninguna coincidencia satisfactoria con los fenómenos astronómicos citados en las inscripciones de diversas estelas y construcciones mayas, tal y como demostró el arqueólogo David H. Kelley.

Sin embargo, tales inscripciones son de particular valor cuando los calendarios y las líneas de mira indican el mismo fenómeno astronómico y confirman, pues, la interpretación astronómica. En Tical y en Uaxactún los mayas anotaron, junto a las líneas de mira del Sol, pares de fechas separadas por múltiplos de año trópico. (Un año trópico o año solar corresponde a 365,24219 días solares medios, es decir, el tiempo entre dos pasos consecutivos del Sol medio —abstracción que corrige las variaciones de velocidad del Sol a lo largo de la eclíptica— por el equinoccio de primavera, o punto de intersección de la eclíptica con el ecuador celeste.) Junto con otros pares de fechas de calendario de otros lugares, resultan cuatro grupos de fechas separadas cada una por un cuarto de año. De ello cabe inferir que esas fechas caen en las cuatro estaciones del Sol a lo largo del año: los equinoccios y los solsticios. Con todo, las fechas se apartan de la cronología estándar unos 45 días, tal como concluyó Kelley.

En principio, las incongruencias de la cronología estándar —y especialmente del traslado de las fechas dadas en las fuentes coloniales a la época clásica de los mayas— no se pueden soslayar; se tienen en cuenta para la datación las inscripciones del período clásico.

Pero, también las inscripciones presentan problemas. Como paso siguiente hay que preguntarse si contienen realmente una información astronómica basada en observaciones. Como los mayas no distinguían entre astronomía y astrología, se entremezclan las descripciones de fenómenos celestes con conceptos religiosos.



3. EN ESTE GLIFO de eclipses del códice de Dresde se representa una serpiente con las fauces abiertas.

ERNST W. FÖRSTEMANN, ADAPTADO POR ANDREAS FULS

Además, los sucesos astronómicos no ofrecen fechas inequívocas, ya que cada constelación planetaria regresa periódicamente. Sólo mediante la combinación de diversos sucesos astronómicos se puede decidir a qué correspondía la fecha anotada en el calendario maya. El astrónomo Charles H. Smiley tomó así en 1975 un eclipse solar visible como fecha inicial de la tabla de Venus; situó de esa manera la correlación en el 2 de julio del año 3344 a.C. (con una constante de correlación de 482.639). Maud W. Makemson se valió en 1946 de una combinación especial de dos eclipses solares y uno lunar en un período de treinta días para determinar la correlación; obtuvo una constante de 489.138.

Pero ninguna de estas propuestas se adaptaba a los nodos lunares, establecidos en 1930 por John Teeple, de una manera que no dependiese de la correlación, a partir de las fechas de eclipses del códice de Dresde. Tan poco satisfactoria como la correlación de Smiley y de Makemson es la propuesta en 1973 por Nancy K. Owen, que se basa en una serie de eclipses de Sol, pero de la que resulta la luna llena en lugar de la luna nueva que se esperaba. Damian Kreichgauer estableció una correlación en 1927 que se adaptaba a las fases de Venus y de la Luna; presentaba, sin embargo, un desajuste de once días con los nodos lunares.

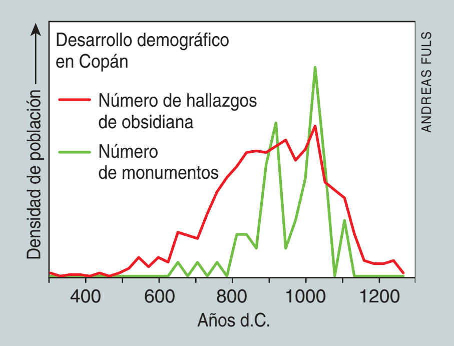
## Primer paso: identificar los acontecimientos astronómicos

Hasta el momento se han propuesto seis correlaciones basadas en fuentes coloniales y 18, como mínimo, a partir de cálculos astronómicos o de otro tipo. Esta diversidad manifiesta lo difícil que es ejecutar un cálculo libre de contradicciones y cumplir simultáneamente todos los criterios conocidos.

Por ello, confeccioné, junto con Bryan Wells, epigrafista de la Uni-

# COMO SE FECHA LA CRONOLOGIA MAYA

**LOS MAYAS** no vivieron en el vacío. El movimiento aparente de los cuerpos celestes influía en su vida, en las guerras, las alianzas matrimoniales con los pueblos vecinos o el comercio de obsidiana con la meseta de Guatemala. Las relaciones de la cultura maya con el "mundo exterior" facilitan distintos métodos de datación, a los que podemos recurrir para contrastar la cronología maya.




ANDREAS FULS

## DATACION MEDIANTE LA OBSIDIANA DE COPAN.

La obsidiana, un tipo de pedernal, fue en el período maya clásico un artículo muy difundido. Todos los estratos de la población fabricaban sus armas y utensilios con él; una vez utilizada, se la desechaba. El tiempo que la obsidiana lleve en la tierra se puede determinar por el grosor de la capa de hidratación en su superficie. Con ello se puede saber la cantidad de obsidiana utilizada a través del tiempo y deducir la evolución de la densidad de población.

En la ciudad maya de Copán creció la densidad de población desde el 500 d.C., alcanzó entre el 800 y el 1000 d.C. su máximo y luego decreció rápidamente. El retroceso demográfico tuvo lugar unos 200 años más tarde de lo que se deduciría de la correlación GMT, ya que la última inscripción en Copán (9.19.11.14.5) pertenece, según la cronología estándar, al año 822 d.C. Ese monumento, cuyo dorso quedó incompleto, describe la subida al trono del último soberano de Copán. Según la nueva cronología de Wells y de Fuls, ocurrió el 19 de diciembre de 1029 d.C., lo cual coincide con la caída demográfica y el abandono de la ciudad de Copán.




LINDA SCHELLE Y PETER MATHEWS, THE CODE OF KINGS, SCRIBNER, NUEVA YORK 1998, PAG. 157




VICTOR E. VILLASEÑOR

**CONTACTOS MIXTECAS.** Durante el período clásico tardío hubo numerosos contactos entre los mayas y sus vecinos de México central, los mixtecas. El acontecimiento que mejor se puede fechar es la visita del noble 3 Monos a Copán; según consta en la estela A, ocurrió el 9.14.19.5.0 (GMT: 1 de diciembre de 730 d.C; Wells–Fuls: 13 de octubre de 938 d.C.) (*ilustración de más arriba*). 3 Monos llegó ese día a Copán, a la edad de 16 años, para llevar, como intermediario matrimonial, una mujer a Xochicalco (en la región central de México, cerca de Cuernavaca). 2 Terremotos, soberano en esta segunda ciudad, eternizó aquel vínculo matrimonial mediante una inscripción en Xochicalco cuya fecha, el año de 4 Liebres (*ilustración de arriba*), corresponde al mismo año 938 d.C. que el 9.14.19.5.0 calculado por la cronología de Wells–Fuls (*tabla inferior*). La introducción del nombre de 3 Monos es por tanto muy significativa, ya que en toda la genealogía mixteca sólo se dio una persona del género masculino con ese nombre.

**Vida de 3 Monos**

| Fuente | Hecho | Fecha | Año |
|---|---|---|---|
| Bodley | Bodas de los padres y nacimiento de 3 Monos | 1 Conejo | 922 d.C. |
| Copán | 3 Monos en Copán como intermediario | 9.14.19.5.0 | 938 d.C. |
| Xochicalco | 3 Monos organiza la boda de 2 Terremotos con una mujer de Copán | 4 Liebre | 938 d.C. |
| Nuttall | Muerte de 3 Monos y sus padres | 3 Junco | 962 d.C. |
| Bodley | Muerte de 3 Monos | 12 Pedernal | 972 d.C. |
| Bodley | Muerte de los padres | 6 Junco | 979 d.C. |

ANDREAS FULS, SEGUN COMUNICACION PERSONAL DE DAVID H. KELLEY

ANDREAS FULS

Venus en la correlación Wells-Fuls
Horizonte
Estela 10
Venus en la correlación GMT
Ventana del templo 22
20°
10°
0°
Altura
250°
260°
270°
280°
290°
Azimut

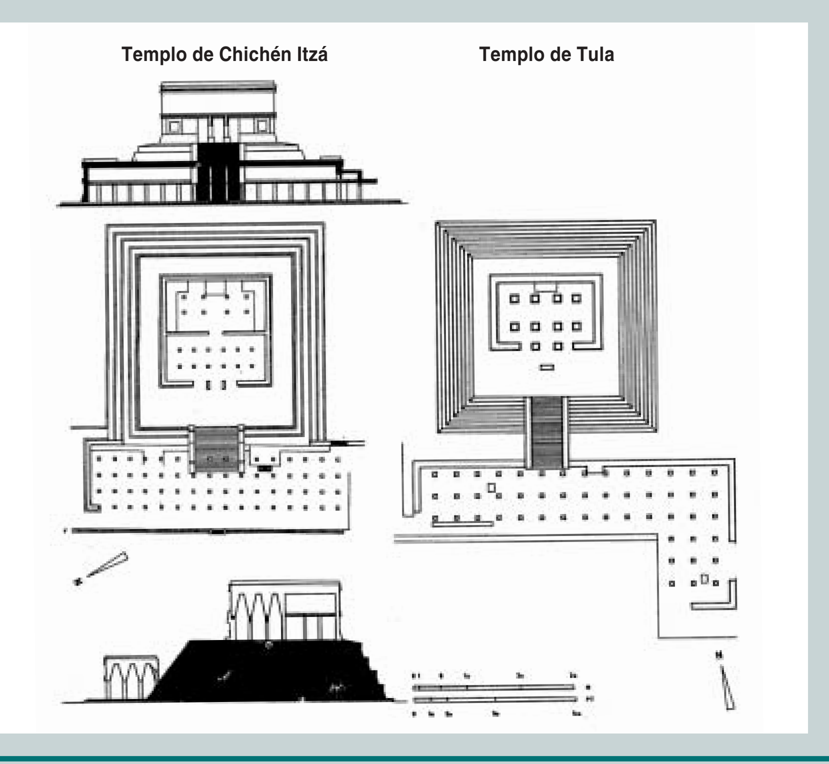
**EL TEMPLO DE VENUS EN COPAN.** A través de la estrecha ventana del templo 22 de Copán se podía ver en el horizonte occidental la estela 10, que llevaba grabada la fecha 9.11.0.00. Dos días antes, según la tabla de Venus del códice de Dresde, se hizo visible Venus como estrella del ocaso; dado que la entrada del templo 22 está adornada con símbolos venusianos, se puede esperar la aparición de Venus en esa fecha y en esa ventana. Si se calcula la fecha con la cronología estándar (correlación GMT), Venus no habría aparecido entonces por la ventana. Siguiendo la cronología desarrollada por Bryan Wells y el autor (correlación de Wells-Fuls), Venus apareció como estrella del ocaso en la ventana el 23 de agosto de 860 d.C. y se ocultó directamente tras la estela.



ERNST W. FÖRSTEMANN, ADAPTADO POR ANDREAS FULS

**LA TABLA DE MARTE** Esta tabla del manuscrito maya de Dresde contiene series de 780 días que corresponden, casi exactamente, al tiempo de la órbita sinódica de 779,94 días del planeta Marte. El escaso resto de 0,06 días suma, después de 19 órbitas, alrededor de un día; esta corrección periódica aparece escrita también en la Tabla. Las fechas al principio de esta Tabla de Marte caen, siguiendo la cronología de Wells-Fuls, en el 11 de febrero de 891 d.C. y el 10 de enero de 1000 d.C.; en esos días el planeta rojo estaba casi exactamente en oposición al Sol y mostraba su brillo más intenso.

**DESARROLLO ESTILISTICO DE LA ESCRITURA MAYA** Cada glifo de la escritura maya conoció un desarrollo continuo desde el principio de la Epoca Clásica hasta el final de la Posclásica. El epigrafista Alfonso Lacadena García-Gallo constató en 1995 que la evolución temporal de los glifos se puede representar como una curva constante; muestra, sin embargo, un hiato de 200 años, según la cronología estándar, entre el final del Clasicismo y el comienzo del Posclasicismo. Este vacío desaparece utilizando la nueva cronología.




HENRI STERLIN, ARCHITEKTUR DER WELT: MAYA, BENEDIKTTASCHEN-VERLAG, BERLIN, PAG. 172

**LOS TOLTECAS EN CHICHEN ITZA** Las fechas de Chichén Itzá cubren un período histórico más bien corto, desde 10.1.17.15.13 hasta 10.8.10.11.0, que equivale en la correlación GMT a un lapso temporal que va del 869 al 998 d.C. y en la correlación de Wells-Fuls del 1075 al 1206 d.C. La sorprendente semejanza de las pirámides, canchas de juego de pelota y largas salas hipóstilas con los edificios de Tula se puede explicar entonces como una influencia tolteca en Chichén Itzá, ya que gracias a la nueva cronología maya, Chichén Itzá existió simultáneamente junto con el imperio tolteca (1000 a 1200 d.C.). La presencia de 6 Pedernales/Mixcóatl/y de su yerno 8 Ciervos/Quetzalcóatl tanto en los códices mixtecas como en la cancha de juego de pelota de Chichén Itzá prueba la pertinencia histórica de la nueva cronología maya.




**4. LA CIVILIZACION MAYA** se extendía por una zona que abarcaba la península de Yucatán en el sudeste de México y la selva de los altiplanos de Belice, Guatemala, El Salvador y Honduras. Hacia el final del Período Clásico se mezclaron influencias centromexicanas con la cultura maya.

versidad de Harvard, una lista de criterios mediante los cuales se puede identificar una referencia a un suceso astronómico con un fenómeno celeste real, antes de utilizarla para el cálculo de una correlación. Cada fuente, tanto si se trata de un códice como de una inscripción en un edificio, ha de mostrar, aun con errores de escritura o de cálculo, fechas coherentes. A continuación, la interpretación de un suceso astronómico tiene que resultar independiente de la correlación, es decir, el suceso ha de remitirse a glifos, líneas de mira o intervalos astronómicos. Además, la interpretación deberá poder verificarse por medio de otras fuentes, para evitar interpretaciones erróneas. Habrá una confirmación, por ejemplo, cuando la fase de luna nueva en la tabla de eclipses del códice de Dresde concuerde con las inscripciones lunares de las estelas, o cuando las fechas del solsticio de invierno queden ratificadas por la dirección del orto solar en el observatorio de Uaxactún.

Gracias a nuestro análisis, identificamos varias fechas del calendario maya que tendrían que estar asociadas con un fenómeno astronómico real, entre ellas la fecha inicial de la tabla de Venus, tres fechas de la tabla de eclipses solares que podrían clasificarse como fases de luna nueva (y en las que consecuentemente podría darse un eclipse, ya que el Sol estaba suficientemente próximo a uno de ambos nodos lunares) y también dos posibles fechas calendáricas para el comienzo de la primavera. Investigamos entonces si existía una correlación que se las adaptase.

## Segundo paso: buscar una correlación

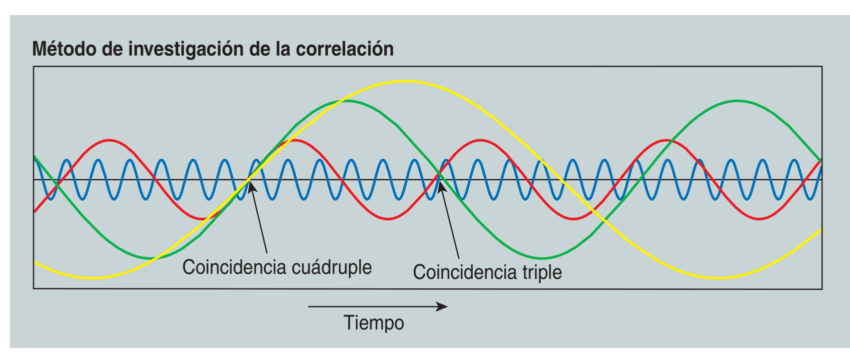
La búsqueda de la combinación correcta de estas condiciones impuestas a la correlación se parecía a buscar una aguja en un pajar: paso a paso elevamos la constante de la correlación en un día, hasta que cubrimos un intervalo temporal de 1200 años, y comprobamos para cada paso si se cumplían las siguientes cuatro condiciones:

- Venus aparece como estrella matutina
- es luna nueva
- el Sol pasa por los nodos lunares
- es el comienzo de la primavera.

De este modo pudimos comprobar si, después de convertir las fechas escogidas del calendario maya en fechas del calendario cristiano, concordaban con un acontecimiento astronómico.

Sesenta y cinco años atrás, Thompson hubiera considerado que acometer semejante trabajo de Sísifo llevaría demasiado tiempo, pero hoy en día un ordenador puede acabarlo en una hora. Nuestro resultado fue muy interesante: las cuatro condiciones astronómicas escogidas tienen un mínimo común múltiplo de unos 2243 años. Por ello, la búsqueda sobre un total de 1200 años daba, como máximo, un resultado para cada combinación de las condiciones de la correlación. De las cinco constantes de correlación encontradas, cuatro, al menos, se situaban entre el 3688 y el 3408 a.C., lo cual adelantaría la cultura maya unos cuantos siglos. Estaría en contradicción con los hallazgos arqueológicos y las crónicas históricas, ya que entonces el hiato entre el final del período clásico y el principio del posclásico, que según la cronología estándar abarca entre cien y doscientos años, se haría mucho mayor. Sólo la quinta constante de la correlación, que sitúa la fecha inicial del cómputo largo en el año 2906 a.C., concuerda con lo que sabemos de la cultura maya; retrasa el final de la cultura maya clásica 208 años, del siglo IX al XI d.C.

De una forma igual extrajimos otros datos astronómicos, con el fin de comprobar más de cerca las cinco correlaciones calculadas. De nuevo la única correlación que se adaptaba a todas las comprobacio-




El autor, junto con Bryan Wells, calculó cuándo coincidían dentro de un determinado intervalo temporal cuatro ciclos astronómicos de longitudes distintas:
- luna nueva (29,530588 días)
- Sol cerca de un nodo lunar (173,31 días)
- Año trópico (365,2422 días)
- tiempo sinódico de la órbita de Venus (583,9229 días)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (*arriba*); ANDREAS FULS/SDW (*abajo*)

nes fue la que tenía por constante 660.208 y situaba la fecha inicial del cómputo largo el 21 de julio del 2906 a.C.

Wells había encontrado ya en 1991 la misma correlación cuando comparó un códice mixteca de Viena con la tabla de Venus de Dresde; pero no pudo entonces demostrar que esta correlación fuera la única que se adaptaba a todos los datos astronómicos. Sólo ha sido factible mediante nuestro método, que prueba sistemáticamente cada combinación posible. Desde que anunciamos en 1998 la nueva correlación, hemos recurrido a otros sistemas de comprobación, incluso no astronómicos, para fijar fechas (*véase el recuadro* "Cómo se fecha la cronología maya"). Concuerdan asombrosamente bien, dentro de su respectiva exactitud, lo que reafirma nuestra propuesta de una nueva cronología de la cultura maya.

¿Qué consecuencias se desprenden de ello? Una de las cuestiones relativas a la cultura maya discutidas más acaloradamente es el porqué de la extinción súbita, en poco más de sesenta años, de la cultura clásica de ese pueblo centroamericano. Hay dos tesis opuestas: una atribuye el ocaso a los cambios climáticos; la otra, a la guerra.

## Nueva cronología de la decadencia

Murallas e inscripciones demuestran el incremento de las actividades bélicas al final de la época clásica. El poder de los reyes mayas se desmoronó y las ciudades fueron abandonadas. La población se redujo a la décima parte; se sabe gracias a la datación de los restos de obsidiana del valle de Copán y mediante investigaciones arqueológicas de los yacimientos de Palenque y Tikal. En Copán, una de las caras del último monumento quedó incompleta, y en Xkipché se encontraron las herramientas dispuestas como si los operarios hubieran tenido que escapar corriendo de la ciudad.

En las ruinas de Seibal, Ucanal, Timbal y Machaquila se mezclaron elementos del clasicismo maya con otros de México central: surgió un nuevo tipo de cerámica y los soberanos representados llevaban nombres, signos del calendario y joyas del centro de México. Mientras que en el sur disminuía la población, las regiones más septentrionales de Chichén Itzá y de Puuc gozaban de un incremento demográfico. Muchos monumentos de Chichén Itzá parecen copias de Tula, situada a 1300 kilómetros de distancia, en México central. Es notoria la importación de ideas nuevas: salas hipóstilas, las estatuas Chac Mool (*véase la figura 5*), columnas en forma de atlante, edificios circulares consagrados al dios del viento e incluso el culto a la serpiente emplumada.

Hasta el momento, no se ha podido hacer responsables de la decadencia de los centros mayas de la época clásica a los toltecas o a los mixtecas procedentes de Tula, ya que, según la cronología estándar, la cultura maya había desaparecido cuando se desarrollaba la de los toltecas (950-1200 d.C.) y la de los mixtecas (a partir de 925 d.C.). Algunos investigadores de la cultura maya quieren incluso ver el origen de Tula en Chichén Itzá, pero lo refutan las formas arquitectónicas y escultóricas, precursoras de la arquitectura típica tolteca, que existían ya hacia el 700 d.C. en las cercanías de Tula.

Siguiendo nuestra nueva cronología, la cultura maya decayó 208 años más tarde. Casa cronológicamente con las convulsiones políticas del centro de México y con el ascenso de los toltecas. Según esta cronología nueva, la inscripción más antigua de Chichén Itzá corresponde al año 1081 d.C.; la última se tendría que fechar entonces en el año 1206 d.C., fecha coincidente con el fin del dominio tolteca en México central.

La nueva cronología explicaría también la introducción de los nombres de dioses procedentes del centro de México en la tabla de Venus del códice de Dresde. A pesar de que esta disposición de las efemérides de Venus proviene originariamente del siglo IX, el códice se completó con inscripciones posteriores. Se aprecia claramente en la tabla solar, en la que las fechas entre el 474 y el 579 d.C. fueron completadas con dos pasos cenitales de los años 1157 y 1166, ambos para la latitud geográfica de Chichén Itzá.

Es muy posible que la actual composición del códice de Dresde se compilase bajo el cielo del observatorio de Chichén Itzá, conocido como El Caracol, cuando la cultura maya formaba ya una simbiosis con la cultura tolteca.



5. ASPECTOS DEL ESTILO de muchos edificios de Chichén Itzá y las estatuas Chac Mool de guerreros recostados dejan ver una conexión de los centros mayas con la ciudad tolteca de Tula, en el México central, a 1300 kilómetros de distancia.



## El autor

**Andreas Fuls** trabaja en el Instituto de Geodesia y Técnicas de Información Geográfica de la Universidad Técnica de Berlín. Desde 1985 se ha interesado por la astronomía y la cronología de la cultura maya.

## Bibliografía complementaria

SKYWATCHERS OF ANCIENT MEXICO. A. F. Aveni. University of Texas Press; Austin, 1980.

THE MAYA CALENDAR CORRELATION PROBLEM. D. H. Kelley en *Civilization in the Ancient Americas*. Dirigido por R. M. Leventhal y A. L. Kolata. Harvard University y Universidad de Nuevo México, 1983.

DIE MAYA. Jeremy A. Sabloff. Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg, 1991.

THE CORRELATION OF THE MODERN WESTERN AND ANCIENT MAYA CALENDARS. B. Wells y A. Fuls. Early Sites Researches Society, 2000.

# Las marismas del Parque Nacional de Doñana

**La diversidad y elevada productividad de las comunidades vegetales de la marisma dependen de un frágil equilibrio con las variables del medio físico y los consumidores. La pérdida de heterogeneidad ambiental amenaza el futuro de estas comunidades**

Luis Clemente, Luis-Ventura García, José Luis Espinar, Juan S. Cara y Adela Moreno

Para entender el proceso de formación de las actuales marismas del Guadalquivir, hay que remontarse al final de la transgresión flandriense, que se inició hace 18.000 años. Durante ese episodio, el nivel del mar ascendió unos 120 metros, invadiendo el continente y organizando grandes estuarios a partir de las desembocaduras de los ríos.

Comenzó así a configurarse el nuevo litoral, cuyo principal agente formador era la corriente de deriva que, con dirección oeste-este, aportaba grandes cantidades de arenas provenientes de la erosión y arrastre de materiales del farallón costero. Se formaron barras arenosas (spits), adosadas a la margen derecha de los ríos, que ocasionaron el cierre de la desembocadura de los cauces menos caudalosos y la creación de lagunas litorales. La datación de la turba acumulada en algunas de estas lagunas (Las Madres) permite establecer el final de la transgresión flandriense, y la correspondiente estabilización del litoral, en 6000 años antes de la actualidad, aproximadamente.

En la zona que hoy ocupa el Parque Nacional de Doñana no existen indicios de esta primera fase progradante, que se supone enterrada por el avance dunar hacia el NE. La formación litoral más antigua aflorante en la marisma de Doñana está representada por los cordones de Carrizosa-Veta la Arena, cuya datación con $C^{14}$ revela una antigüedad de 4735 años. Su orientación NE, perpendicular a la dirección de las barreras principales, evidencia un primer episodio erosivo con entrada del mar en el estuario y señala el inicio de la formación de una marisma protegida del mar por los cordones mencionados.

Se produjo luego una segunda fase progradante, a la que se asocia una malacofauna típicamente estuarina. Su datación mediante $C^{14}$, en los sedimentos adosados a Carrizosa y Mari López, nos remonta entre 3200 y 3500 años atrás. La disposición de estos depósitos muestran ya una marisma parcialmente emergida. Y siguió el proceso de colmatación del estuario hasta el advenimiento de una nueva fase erosiva.

Se refleja el período erosivo en la orientación de los cordones arenosos de Vetalengua y Las Nuevas, formados hace unos 1800-2000 años. Coincidiendo con esta fase, tiene lugar el establecimiento del asentamiento romano del Cerro del Trigo, que abarcaría desde el siglo II d.C. hasta la segunda mitad del siglo V. Los historiadores latinos de la época hablan de la existencia del lago “Ligustinus” en la desembocadura del Guadalquivir, esto es, una marisma mareal surcada por caños navegables, incluso en marea baja.

A esa fase progradante le sucedió otra. Se caracterizó por el crecimiento de las formaciones litorales, el retroceso de acantilados y el incremento de la colmatación del estuario. Se formaron entonces los cordones de la Marismilla, de dirección SSE, de hace unos 1775 años los más antiguos. La presencia de los cordones forzó un desplazamiento de la desembocadura del Guadalquivir hacia el sudeste, llegando a la flecha litoral de la Algaida (margen izquierda) en torno al año 1000 de nuestra era. Las pruebas de este desplazamiento quedan reflejadas en los extensos lucios de la marisma de Doñana (Membrillo, Ansares y Rey).

La coincidencia de este cierre con el incremento de la influencia humana en la cuenca, que aumentó la carga de sedimentos del río por la erosión edáfica asociada a la agricultura y deforestación de la cuenca,



LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO

**1. LOS APORTES DEL CAÑO** de la Madre de la Marisma del Rocío son actualmente los más significativos, de carácter fluvial, que recibe la marisma de Doñana, por la zona NO. La prolongada acción de las aguas ácidas y muy poco salinas, provenientes del Arroyo de la Rocina, han propiciado el desarrollo de suelos singulares (vertisoles) y la presencia de especies que no resisten los niveles de salinidad, ni la dinámica de inundación que imperan en la mayor parte de la marisma del Parque.

aceleró la colmatación del estuario y propició su progresiva independización de la influencia marina, es decir, su continentalización.

Un último episodio erosivo dio lugar a la aparición de los cordones de la Plancha, hace 1175 años; precedió a la última fase progradante que, desde hace unos 1000 años, llega a nuestros días. En esta fase se han formado los cordones de San Jacinto y un importante manto eólico.

Asistimos ahora a una intensificación de la deriva litoral y a la erosión en la parte terminal de los cordones de San Jacinto, con aparición de ganchos de dirección NE que se adentran en el canal del Guadalquivir. Este proceso, que recuerda los eventos erosivos precedentes, puede estar relacionado con una tendencia actual de ascenso del nivel marino, a la que apuntan diversos modelos climáticos. Durante esta última fase progradante, la marisma ha continuado colmatándose, hasta el punto de que la marea, perceptible hasta época muy reciente en los cauces marismeños, sólo afecta ya al Guadalquivir y, en menor medida, al Brazo de la Torre.

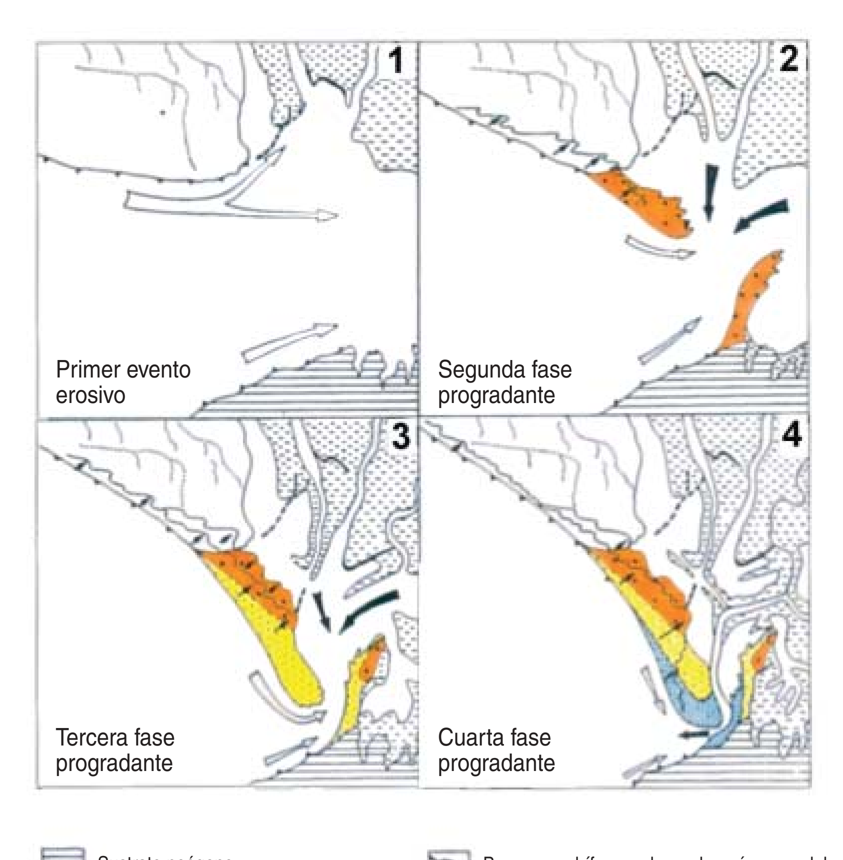
En definitiva, se pasó de una situación exorreica a otra endorreica, de una marisma fluvio-mareal a una marisma esencialmente pluvial. Este cambio aceleró la colmatación, acentuada durante el último siglo por la actividad agrícola y la deforestación de las riberas que desaguan en la marisma.

## Dinámica de inundación

Como resultado de los procesos descritos, la actual marisma de Doñana puede calificarse de muy evolucionada o senescente. Se comporta como una llanura de inundación estacional con escasa influencia mareal, sobre todo desde la construcción, en 1984, del dique "Montaña del Río", que discurre paralelo al cauce del Guadalquivir.

A mediados del siglo pasado, se inició la última y más drástica serie de transformaciones que terminaron por reducir los aportes hídricos superficiales a menos de un tercio de sus valores anteriores. Debido a ello se alteró profundamente el balance hídrico de la marisma. La principal merma en la entrada de agua derivó del encauzamiento y desviación hacia el Guadalquivir de diversos cursos fluviales que hasta entonces desaguaban en la marisma; quedaron sólo los aportes de los arroyos de la Rocina y del Partido, junto con los de la precipitación directa.

Desde los años cincuenta, se opera, en efecto, un cambio cualitativo en




2. ETAPAS DE FORMACION de la Marisma del Parque Nacional de Doñana durante el Holoceno (según A. Rodríguez, 1998).

la distribución espacial, régimen de circulación y persistencia del agua en la marisma de Doñana. La marisma ha venido acentuando su carácter endorreico, recibiendo los aportes de agua más concentrados y perdiendo gradualmente espesor la lámina de agua, por evapotranspiración, hasta su total desecación durante el verano.

Dos hechos clave diferencian este régimen hidrológico del régimen de inundación anterior. En primer lugar, la persistencia de la inundación y de la humedad superficial del suelo pasó a depender del espesor que alcanzase la lámina de agua en la estación húmeda. Antes, era posible un mantenimiento más prolongado de la humedad de las zonas deprimidas, particularmente en los caños, merced a las distintas aportaciones de los cursos que en ellos desaguaban. En suma, podían mantenerse húmedas las zonas deprimidas sin necesidad de que la lámina de agua alcanzara un espesor excepcional y anegara las zonas elevadas. En segundo lugar, la reducción de la circulación superficial en los antiguos caños, que recibían aportes de los arroyos y terminaban evacuando en el estuario, ha determinado un menor lavado y eliminación de las sales solubles que ascienden por capilaridad desde la capa freática. Al acentuarse el carácter de cubeta de evaporación, los solutos se concentran en los suelos de zonas deprimidas; se producen acúmulos superficiales de sales solubles que, en algunos casos, forman depósitos de varios centímetros de espesor.

Estas tendencias se vieron acentuadas a partir de 1984, cuando se construyó en la zona sur el dique mencionado para contener el drenaje natural hacia el Guadalquivir, al sobreelevar la cota natural de desagüe. Con ello se lograba retener el doble de agua en la marisma, aumentar en casi un 20 % la superficie inundada y, por tanto, retrasar su desecación durante el verano. Tras la extensión del dique hacia el norte, en 1998, para prevenir la posible contaminación derivada del accidente de las minas de Aznalcóllar, la marisma se ha convertido en un compartimiento prácticamente estanco, susceptible de quedar sumergida en años de precipitaciones muy superiores a la media. El drenaje depende ya de su regulación a través de compuertas.

## Geomorfología

Actualmente, la marisma de Doñana es una extensa planicie aluvial de unos 300 km$^2$ con morfología típica de llanura de inundación de leve altitud (no supera en general los dos metros sobre el nivel del mar) y suave pendiente (inferior al 2 por mil). El microrrelieve, de orden decimétrico, representa el criterio básico para su diferenciación en unidades geomorfológicas, por ser la característica que mejor expresa tanto la diversidad morfológica y funcional actual como la génesis de los elementos del paisaje.

En la marisma se han distinguido tradicionalmente tres unidades en función de la microtopografía: bancos, zonas de transición y depresiones. Estas unidades reflejan la dinámica geomorfológica ocurrida durante el Holoceno, comentada al principio.

Los bancos, que allí se denominan “paciles” y “vetas”, son las zonas más elevadas. No suelen quedar anegadas, salvo en épocas de avenida. Los paciles, de textura arcillo-limosa, se corresponden con elevaciones (“levées”) de los caños que divagan por la marisma, algunos de los cuales han dejado de funcionar. Las vetas, elevaciones más o menos aisladas y de dimensiones reducidas, presentan muy diversa naturaleza y origen: las arcillosas son restos fragmentados y erosionados de antiguos paciles y las arenosas con malacofauna, restos de



formaciones litorales antiguas que han quedado incluidas dentro de la marisma. Aunque también aparecen vetas arenosas sin conchas que derivan de dunas superpuestas a dichas formaciones litorales.

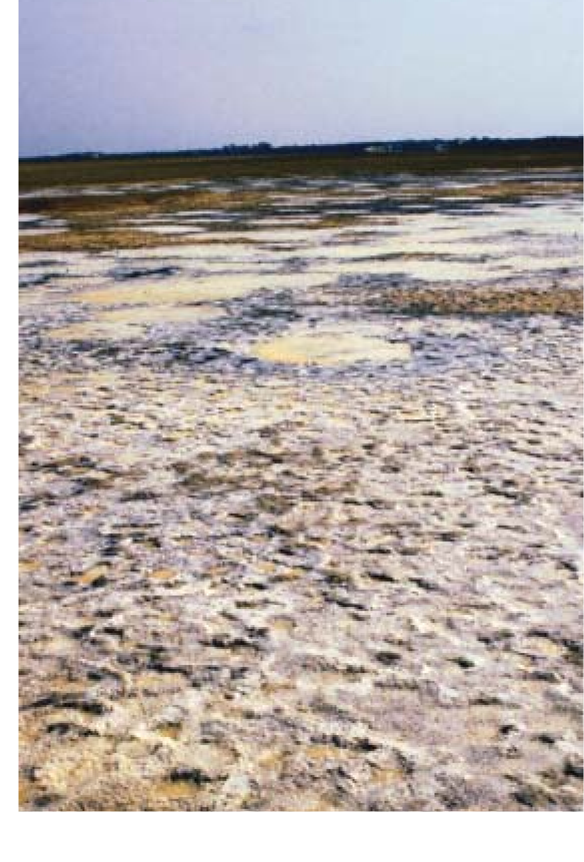
Las zonas de transición o "quebradas", de elevación intermedia, tienen su origen en la colmatación por materiales limo-arcillosos de antiguas depresiones y cauces. Actualmente, la lámina de agua apenas llega a alcanzar un palmo en los años normales.

Las zonas deprimidas, donde la inundación persiste durante muchos meses y alcanza cerca de un metro de profundidad en años lluviosos, se corresponden con los caños y lucios. Los primeros son restos de antiguos canales de marea colmatados que, ahora, operan sólo como cauces temporales. La mayoría de ellos han sido truncados por la acción humana y se limitan a acumular las aguas de precipitación. Los lucios, depresiones de morfología lagunar y profundidad variable, derivan de la fragmentación de antiguos cauces fluvio-mareales abandonados.

## Cuatro tipo de suelos

La diversidad y distribución geográfica de los suelos de la Marisma de Doñana guarda una estrecha relación con la de las unidades y subunidades geomorfológicas. De hecho, puede afirmarse que la evolución geomorfológica suministra el marco a la evolución de los suelos.

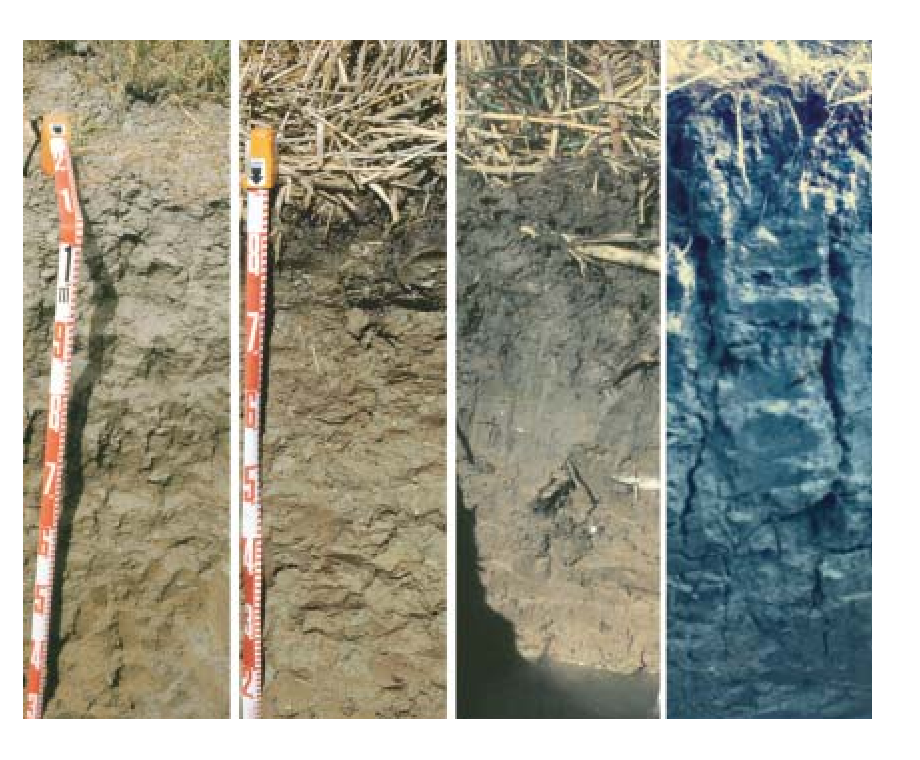
Las características fundamentales de los suelos de la marisma vienen determinadas, en última instancia, por el carácter reciente de los sedimentos, a partir de los cuales se han desarrollado (suelos estratificados y poco evolucionados), por las propiedades físico-químicas de los mismos (arcillo-limosos, calcáreos y salinos) y por el régimen hidrosalino (que depende de la posición geográfica y fisiográfica del punto). Tiene importancia local la presencia de materiales de otra naturaleza (depósitos de arenas conchíferas o silíceas), la influencia de surgencias del nivel freático ("ojos"), la existencia de corrientes de agua dulce y, en pequeños enclaves del sur, la influencia mareal ("playas").



3. LAS DEPRESIONES ENDORREICAS de la marisma tienden a comportarse como sumidero de agua y solutos. Al final de la estación seca se forman acúmulos superficiales de sales solubles —en las que predominan los cloruros de sodio y magnesio— que excepcionalmente llegan a formar costras de varios centímetros de espesor, con la creación consiguiente de suelos extremadamente salinos. Ello impide el establecimiento de los vegetales.

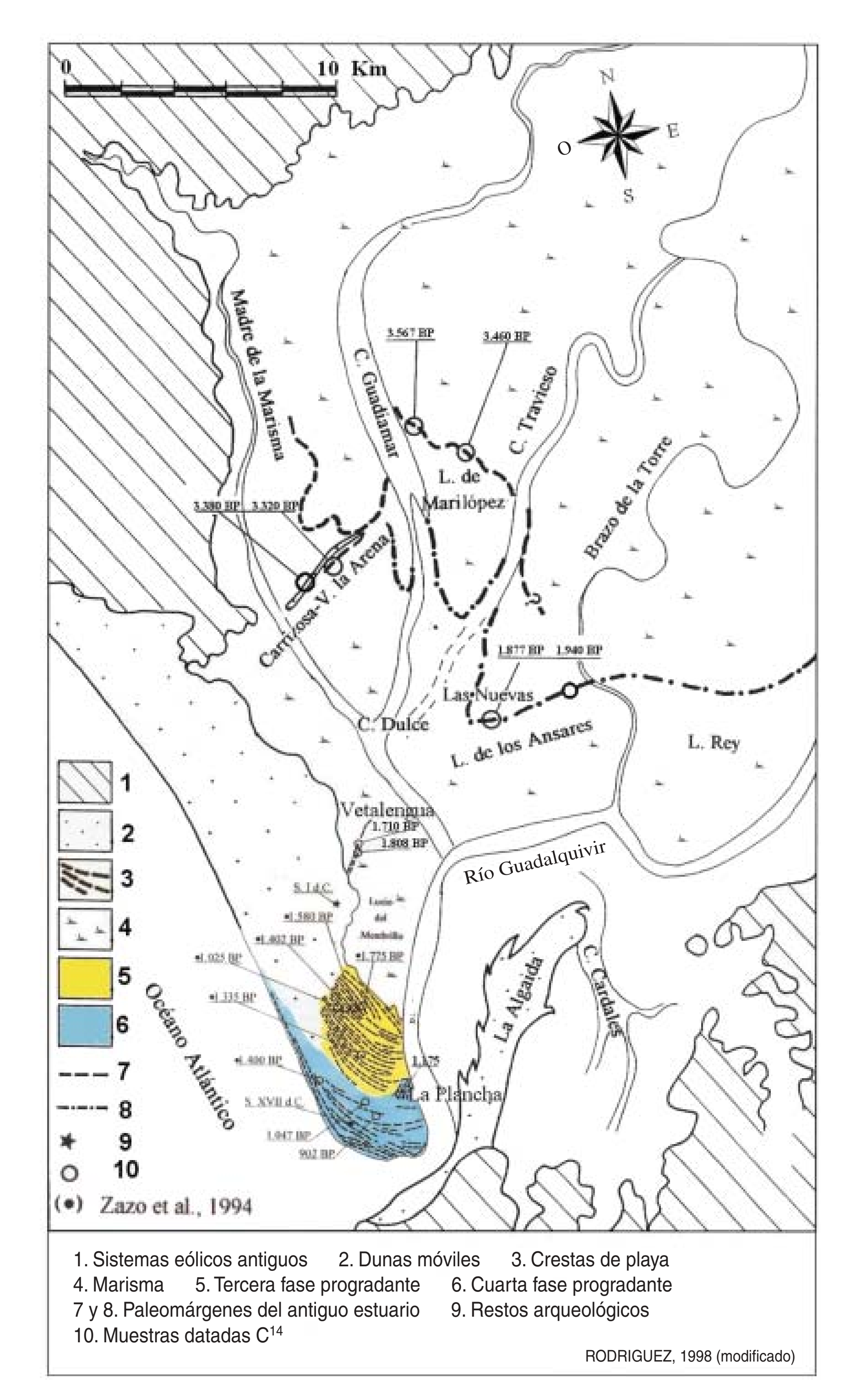
Los suelos dominantes en el área carecen de rasgos indicativos de evolución del perfil, salvo una fuerte acumulación de sales derivada del ascenso capilar de la capa freática salina y de la evaporación de la lámina de agua superficial; en lenguaje técnico, se trata de entisols.

En los casos más extremos, la acumulación de sales solubles permite definir suelos hipersalinos, asimilables a los de zonas áridas, en tanto



4. LAS DIFERENCIAS en el régimen de inundación y aireación de los sedimentos arcillosos que constituyen el sustrato la marisma y la acción de las raíces vegetales han propiciado la diferenciación física, química y morfológica de los suelos de la marisma. Todos los perfiles de la figura corresponden a la estación seca. Los tres de la izquierda pertenecen a suelos salinos del este de la marisma con distinto régimen de inundación (de izquierda a derecha: elevación con quenopodiáceas; zona temporalmente inundable con *Scirpus* y zona con inundación persistente con *Phragmites*). El perfil de la derecha corresponde a un vertisol del NO de la marisma, en el que el sedimento arcilloso ha evolucionado por efecto de la acción prolongada de las aguas ácidas y oligohalinas procedentes de la zona de arenas del Parque.

LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO




1. Sistemas eólicos antiguos 2. Dunas móviles 3. Crestas de playa
4. Marisma 5. Tercera fase progradante 6. Cuarta fase progradante
7 y 8. Paleomárgenes del antiguo estuario 9. Restos arqueológicos
10. Muestras datadas $C^{14}$

RODRIGUEZ, 1998 (modificado)

5. DATACION por $C^{14}$ de las diferentes fases progradantes y erosivas ocurridas en la formación de la marisma desde el final de la transgresión flandriense.

que inducen sequía fisiológica; hablamos entonces de aridisols.

En la zona próxima al ecotono arenas-marisma, los sedimentos arcillosos han evolucionado hacia suelos poco salinos, cuya característica más destacada es la contracción en época seca y la expansión en época húmeda, así como la rotación del perfil a través de las grietas que se producen en la época seca; en edafología estos suelos reciben el nombre de vertisols.

Por último, en determinados puntos, las surgencias de agua dulce dentro de la marisma salina ("ojos") y su evaporación en la superficie del suelo da lugar a la aparición de características propias de suelos incipientes o inceptisols.

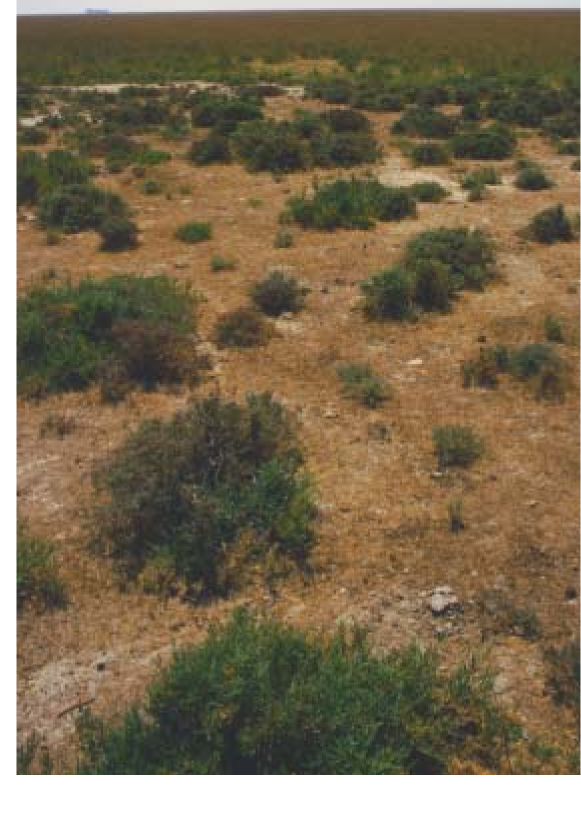
Los suelos fuertemente salinos se encuentran entre los más extendidos. Ocupan por igual tanto zonas elevadas como deprimidas. En las zonas elevadas, sólo las plantas leñosas suculentas (*Arthrocnemum*) pueden resistir todo el año. Durante el invierno y primavera, aprovechando el descenso de la salinidad superficial y la disponibilidad de agua, estos suelos sustentan un tapiz de hierbas anuales de densidad variable que persisten durante la estación seca en el banco de semillas. En las zonas deprimidas, la dilución de la salinidad superficial puede permitir el desarrollo de comunidades de plantas junciformes (ciperáceas del género *Scirpus* acompañadas de anuales sumergidas) cuyos rizomas subterráneos resisten la estación seca.

Los entisoles son suelos jóvenes con muy escaso desarrollo de horizontes. Predominan en la marisma del Parque Nacional de Doñana y son salinos casi todos ellos, aunque no en el grado de los aridisoles. Esta menor salinidad se debe a varios factores: el nivel freático hipersalino se encuentra a mayor profundidad (zonas elevadas de vetas y paciles), el nivel freático es menos salino o existe un lavado superficial del suelo asociado a la presencia de corrientes de agua superficial (por ejemplo, en las zonas influenciadas por el caño de la Madre); los dos últimos factores pueden darse juntos. Su distribución geográfica coincide con las zonas más elevadas (paciles y vetas) o con los grandes caños que recogen el drenaje de los arroyos que desaguan por el norte de la marisma. Sobre estos suelos medran las comunidades más diversas (pastizales de zonas elevadas) y productivas (zonas deprimidas con alta densidad de *Scirpus* y de acuáticas anuales sumergidas).

Los inceptisoles, suelos de desarrollo incipiente, se concentran alrededor de algunas surgencias de agua freática poco salina (5 gramos de sales por litro de agua) en comparación con áreas deprimidas

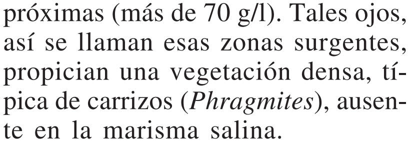
LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO





6. LAS ZONAS ligeramente elevadas de la marisma permanecen libres de inundación durante la estación húmeda. La mayor aireación del suelo y el lavado superficial por el agua de lluvia permite el establecimiento de muchas especies anuales; generan éstas pastizales que sirven de alimento para muchos consumidores primarios hasta el inicio de la estación seca. Durante la misma perduran sólo los rodales de quenopodiáceas leñosas suculentas (*Arthrocnemum macrostachyum*, principalmente).

LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO



próximas (más de 70 g/l). Tales ojos, así se llaman esas zonas surgentes, propician una vegetación densa, típica de carrizos (*Phragmites*), ausente en la marisma salina.

Los vertisoles presentan un elevado contenido de arcilla (más del 50 %) y son, en general, poco salinos. Durante la estación seca pueden desarrollar grietas de varios centímetros de amplitud, a través de las cuales se introducen materiales de las capas superficiales hasta más de 50 cm de profundidad. En la estación húmeda las arcillas se hinchan, produciéndose el cierre de las grietas. Esto provoca la continua rotación de los materiales del suelo, manteniéndose un perfil muy homogéneo con escaso desarrollo.

La mayoría de los vertisoles se encuentran cerca de la zona de contacto con el sistema eólico (arenas), donde descargan acuíferos y cursos de agua dulce. Al igual que los entisoles de las zonas deprimidas, sustentan comunidades de plantas junciformes (especialmente ciperáceas de los géneros *Scirpus* y *Eleocharis*) y de plantas anuales sumergidas menos tolerantes a la salinidad.

## Interacciones abióticas

Lo mismo durante la estación húmeda que durante la extensa sequía estival, la marisma de Doñana constituye una monótona planicie que, en apenas tres meses, pasa de cenagal rebosante de vida animal y vegetal a estepa semidesértica, con amplias extensiones desnudas, cuarteadas y salinizadas, y el resto, mayoritariamente cubierto por un matorral halófilo y suculento de pequeño porte.

Tal variación temporal en las características del medio impone fuertes restricciones al desarrollo de la vegetación. Asistimos a fluctuaciones de gran magnitud en la disponibilidad de agua y en la salinidad del sustrato.

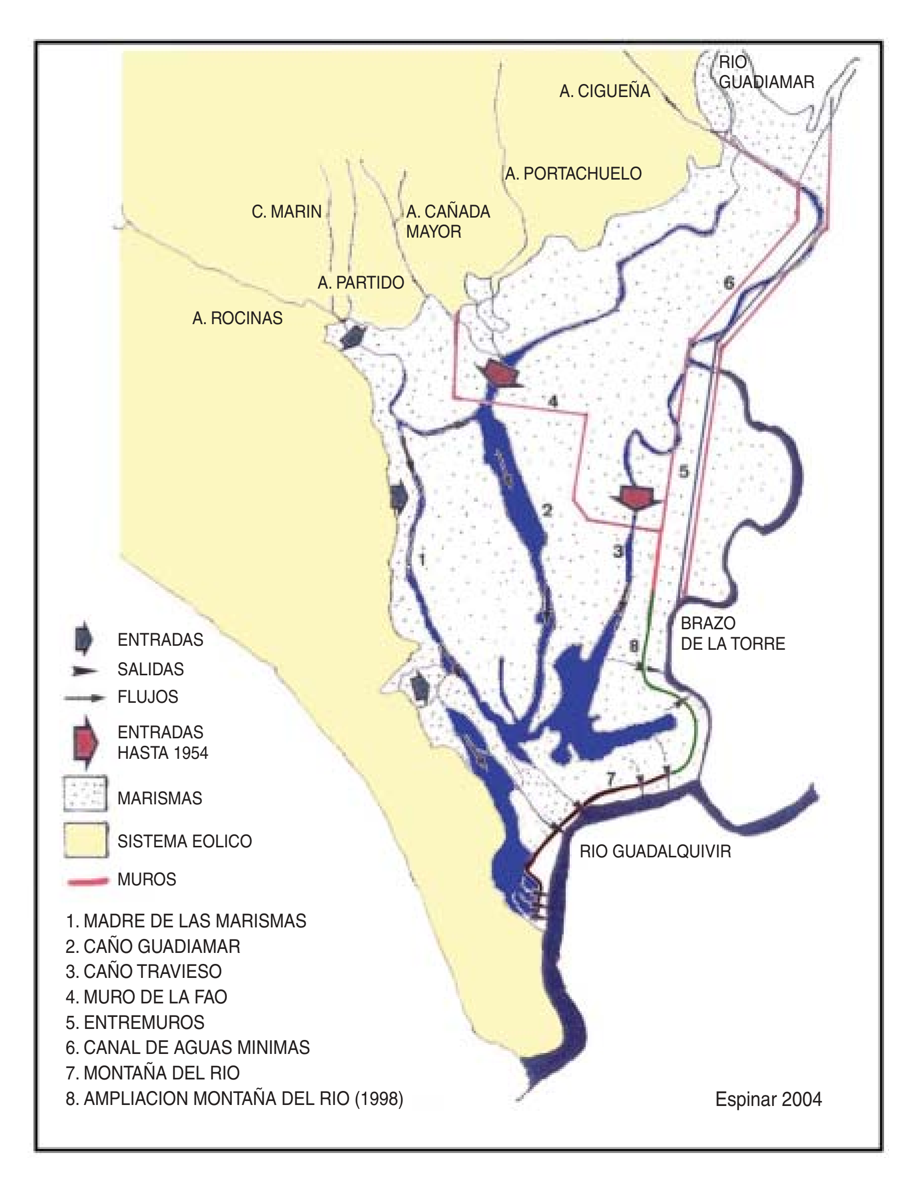
Durante la estación húmeda, gran parte de la marisma permanece inundada, cae bruscamente el contenido de oxígeno del suelo, para alcanzar muy pronto condiciones reductoras, incompatibles con el desarrollo de la mayoría de las plantas. Pero, simultáneamente, se diluyen las sales en el primer decímetro de suelo y se crean condiciones aptas para el establecimiento de plantas acuáticas de ciclo corto y para el rebrote de plantas perennes anfibias o “helófitos”.

Resistentes a la sequía estival, los rizomas de los helófitos comienzan a reactivarse a finales del otoño, cuando la lámina de agua se consolida. En apenas cuatro meses, las comunidades de zonas bajas explotan su capacidad para sobrevivir en condiciones reductoras, aprovechando los ingentes recursos hídricos poco salinos y las elevadas dosis de luz incidente; se genera así una de las cubiertas vegetales más productivas.

Unas pocas especies de helófitos hacen emerger un tapiz vegetal impenetrable, que supera el metro de altura. Ponen a disposición de los herbívoros hasta 30 toneladas de biomasa herbácea por hectárea y año. Al propio tiempo, estas comunidades de ciperáceas perennes almacenan una parte notable de sus asimilados en órganos de reserva y resistencia, a partir de los cuales se extiende la población (mediante rizomas gemíferos subterráneos) y rebrotan los vástagos en la siguiente estación húmeda.

Los rizomas de los helófitos, muy ricos en hidratos de carbono, representan un auténtico maná para las exhaustas anseriformes que invernan en la marisma de Doñana y que consiguen removiendo los suelos donde se establecen.

A su vez, el tapiz de plantas acuáticas (principalmente algas carófitas sumergidas y diversos grupos de fanerógamas), que se desarrolla entre los vástagos de helófitos emergentes, genera, a partir del banco de propágulos presente en los primeros centímetros de suelo (en cantidades próximas a los 5000 millones por hectárea), una producción de hasta cinco toneladas por hectárea y año de biomasa herbácea seca.




**7. HIDROLOGIA SUPERFICIAL** de la marisma del Parque Nacional. Se indican los principales aportes hídricos, los puntos de drenajes al estuario regulados por compuertas y las principales transformaciones de origen antrópico ocurridas en la zona desde los años cincuenta del siglo pasado.

No termina aquí el potencial productivo de estas zonas deprimidas de la marisma. Otras efímeras esperan en el banco de semillas a que la lámina de agua se evapore para colonizar las zonas antes ocupadas por las acuáticas, ya fenecidas, generando un ralo tapiz de hierbas adaptadas a suelos húmedos y a las condiciones de elevada insolación, temperatura y salinidad que imperan en estas zonas. Son hierbas suculentas (*Suaeda*, *Salicornia*, *Salsola*), capaces de eliminar las sales a través de las hojas (*Aeluropus*, *Crypsis*, *Cressa*), que explotan este hábitat antes del advenimiento de las primeras aguas otoñales.

La multiplicación temporal del hábitat asociada a la evolución estacional de las características del medio físico permite la coexistencia sucesiva, en un mismo punto, de comunidades con estrategias vitales y adaptaciones diferentes.

## Factor tiempo

Sería demasiado prolijo analizar en detalle todas las posibles fuentes de diversidad ambiental existentes en las marismas de Doñana, pero debemos citar al menos una más de gran importancia: la evolución en el tiempo. Este factor determina que las depresiones formadas por los mismos materiales, y que actualmente presentan un régimen hidrológico similar, creen suelos (y vegetación) notablemente diferenciados.

Como hemos dicho, las depresiones inundables de la marisma funcionan a modo de grandes lagunas, que acumulan fundamentalmente agua de lluvia y terminan perdiéndola por evaporación. Sin embargo, hasta no hace mucho, los caños actuaron como cauces fluviales más o menos divagantes por las que circulaba el agua que, finalmente, se evacuaba al Guadalquivir.

Los lucios, sin embargo, han funcionado como cubetas de evaporación, durante cientos de años; en vez de zonas de tránsito de agua, se han convertido en sumideros de agua y sales, generando un medio poco favorable para la proliferación de especies perennes y, como resultado, presentan suelos de características químicas y físicas diferenciadas y un aspecto desolador en la época estival.

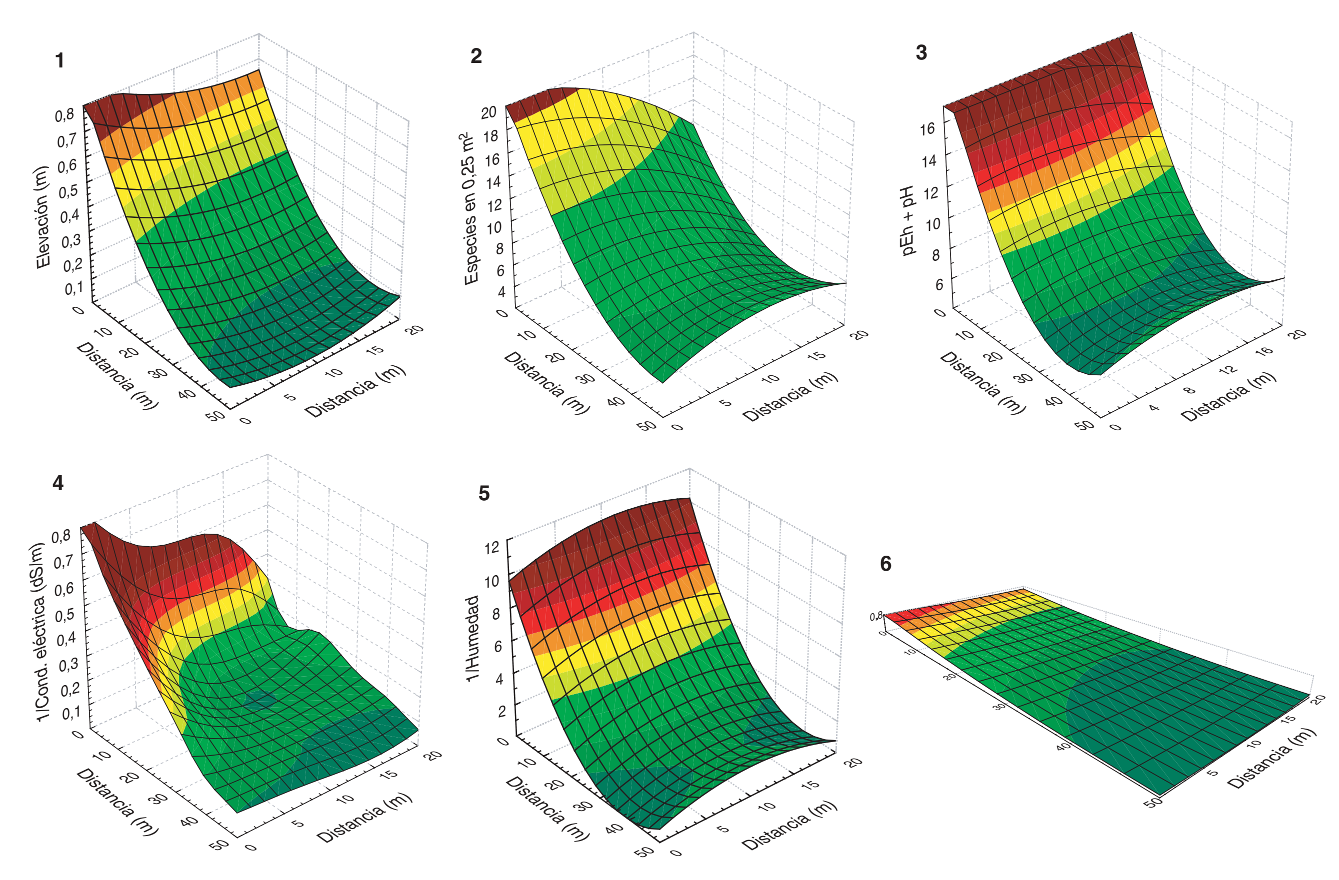
## Interacciones bióticas

La diversidad del hábitat inundable de la marisma no deriva sólo de la influencia de la variación cíclica de las características hidrológicas y edáficas. Hasta no hace mucho se pensaba que un medio físico exigente, que llevaba hasta el límite las capacidades fisiológicas de las plantas, determinaba *per se* las especies que podían establecerse, por exclusión de las que carecían de las adaptaciones necesarias.

Sin embargo, cada vez se acumulan más pruebas de que ciertas comunidades vegetales, una vez establecidas, inducen modificaciones locales de las características químicas y físicas del suelo y de la lámina de agua que las circunda, para afectar, de ese modo, al asentamiento de otras especies.

Según parece, las comunidades de helófitos del género *Scirpus* modifican el régimen de oxigenación, estructura, consistencia y composición del suelo, así como las características químicas de la columna de agua que lo inunda. Actúan como una suerte de "bomba" que libera al medio nutrientes inmovilizados en el sedimento. Al mismo tiempo,

LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO




8. VARIACION DE LOS PARAMETROS AMBIENTALES y de la riqueza de especies con la microtopografía en un área de dimensiones reducidas (1000 $m^2$), con un desnivel máximo de 80 cm. El diagrama 1 representa los valores de elevación relativa; el 2, los cambios en la riqueza de especies de plantas herbáceas por unidad de superficie, en el mismo gradiente de elevación; los tres siguientes, la variación de distintas características del horizonte superficial del suelo que revisten interés para el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Los valores del parámetro pEh + pH crecen con la aireación del suelo, mientras que los del inverso de la conductividad eléctrica (1/CE) y los del inverso de la fracción ponderal de humedad (1/Humedad) decrecen con la salinidad y con disponibilidad de agua en el suelo, respectivamente. Por fin, el diagrama 6 ilustra los mismos datos que el diagrama 1, si bien mantiene las proporciones reales en los tres ejes de coordenadas.

LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO

aporta calcio a la columna de agua, cuyo efecto tampón determina las formas dominantes de carbono disuelto que se encuentra a disposición de otros productores primarios.

Todo ello hace que ciertas especies acuáticas sumergidas, capaces de aprovechar mejor estas condiciones, se vean favorecidas en la vecindad de los helófitos, mientras que otras dominen en zonas igualmente inundables, aunque más alejadas de ellos. Así, la conjunción de un hábitat fluctuante en el tiempo con interacciones bióticas y abióticas multidireccionales puede generar un sinfín de variaciones locales de las condiciones ambientales, que pueden ser explotadas por un número de especies muy superior al que cabría esperar en una planicie homogénea.

## Gradiente microtopográfico

La diversidad ambiental de la marisma no se agota en las depresiones inundables. Junto a ellas, encontramos extensas zonas ligeramente elevadas (0,5-1,0 m) donde las condiciones ambientales varían en el transcurso del año. Para las plantas, estas zonas forman suelos bien aireados y no soportan inundación prolongada, la mayoría de los años. A su vez, tampoco presentan algunas de sus ventajas, ya que soportan, en la zona de influencia de las raíces, los prolongados períodos de sequía que impone el clima mediterráneo.

Como podría esperarse, un gran número de especies adaptadas a las fluctuaciones propias del clima mediterráneo prosperan en estas zonas. En efecto, se han detectado más de dos centenares de especies de plantas herbáceas diferentes, en comparación con unas decenas escuetas en las zonas con inundación prolongada.

Sin embargo, otra característica del suelo impone a las plantas, que colonizan estas microelevaciones, una restricción adicional que no concurre en la mayoría de los hábitats de clima mediterráneo: la presencia de un nivel saturado, próximo a la superficie (entre 1,2-1,8 m, en la estación seca, y entre 0,5 y 1 m, en la estación húmeda), con una concentración de sales solubles (principalmente cloruro sódico) que llega a triplicar la salinidad del agua del mar. La salinidad supera, en efecto, los 100 gramos de sal por litro. Su ascenso por capilaridad hasta cerca de la superficie del suelo influye no sólo en los horizontes directamente afectados por la oscilación estacional, sino también en los situados varios decímetros más arriba.





9. LA MAYOR PARTE DE LAS DEPRESIONES inundables no salinizadas de la marisma desarrollan en la estación húmeda un denso tapiz de helófitos emergentes, dominado por ciperáceas del género *Scirpus*. Junto con éstas se desarrolla una cubierta de macrófitos anuales sumergidos, en la que abundan algas carofitas (*Chara*, *Nitella*), plantas acuáticas superiores (*Zanichelia*, *Ruppia*, *Ranunculus*, *Callitriche*) y colonias flotantes de clorofilas (*Volvox*). Tamaña producción primaria, aérea y subterránea, se aprovecha por los herbívoros de Doñana a lo largo del ciclo anual.

Aunque las lluvias otoñales y primaverales lavan las sales acumuladas en el primer decímetro, la mayoría de las especies anuales han de gozar de cierta tolerancia a la salinidad para completar su ciclo biológico en estas condiciones. Se llega así a un tapiz herbáceo mediterráneo peculiar, con algunas asociaciones y especies características, que da lugar a un pastizal rico en gramíneas y leguminosas y de productividad moderada (hasta 5 Tm/Ha/año), esencial para la alimentación de la fauna herbívora del Parque. Se trata de un recurso complementario, en tiempo y calidad, al de la vegetación de las zonas inundables.

## Plantas leñosas

En lo que respecta a las plantas leñosas, la mayoría de las especies adaptadas al clima mediterráneo requiere, al menos, un aporte subterráneo de agua de características adecuadas para poder resistir todo el año. Casi ninguna de ellas puede tolerar un nivel freático hipersalino como el existente en las zonas elevadas de la marisma. De hecho, sólo unas pocas especies propias de ambientes hipersalinos aprovechan este recurso subsuperficial, manteniéndose verdes todo el año: las quenopodiáceas leñosas de los géneros *Arthrocnemum*, *Suaeda* y *Sarcocornia*.

El almajo salado (*Arthrocnemum macrostachyum*) es, con diferencia, la quenopodiácea leñosa más extendida en la marisma de Doñana. Su éxito se relaciona con su capacidad combinada de aprovechar las aguas hipersalinas subsuperficiales, durante el verano, y de resistir la inundación somera hasta varios meses, durante la estación húmeda. De ahí que haya ido ganando terreno a medida que progresaron los procesos de desecación, colmatación y salinización de la marisma. Desde el punto de vista cuantitativo las comunidades de *Arthrocnemum* superan las 60 Tm/Ha de biomasa seca, si bien su productividad anual es baja y los tejidos suculentos que presenta son poco consumidos por la fauna herbívora, salvo en casos de extrema necesidad.

Sin embargo, el papel funcional de las plantas leñosas en la protección de especies anuales frente a la presión de los herbívoros y en la



10. EL MOSAICO DE AMBIENTES de la marisma se pone de manifiesto en las imágenes multiespectrales captadas al final de la estación húmeda. La composición de la figura, ha sido elaborada por Menanteau y Geffray para un proyecto de investigación en curso, a partir de una imagen captada por el sensor multiespectral de SPOT 2 en junio de 2000, combinando un índice normalizado de vegetación (que realza el contraste entre el infrarrojo cercano y el rojo característico de la vegetación fotosintéticamente activa) con los dos canales situados en el rango visible (*verde y rojo*). Se separan las zonas deprimidas con inundación somera y sin vegetación helofítica activa (*morado/violáceo*) de las que la presentan (*verde intenso*). Las zonas elevadas (*Arthrocnemum*) se distinguen por su coloración pardo-verdosa. La gran cantidad de matices intermedios, visibles en las zonas de transición, da idea de la enorme variabilidad espacial de los parámetros ambientales existente en la marisma en un momento dado.



generación de hábitats de microclima diferenciado de las zonas descubiertas, reviste sumo interés para mantener la heterogeneidad ambiental y preservar un buen número de especies herbáceas.

## Situaciones intermedias

Entre los dos extremos descritos del gradiente marismeño, se suceden una infinidad de situaciones intermedias, que difieren ligeramente entre sí en el régimen de inundación y oxigenación del sustrato y en la salinidad del mismo. Ello produce una variación gradual de la densidad y composición de la cubierta vegetal, hasta que se llega a la sustitución de la especie o especies perennes dominantes por otra u otras mejor adaptadas a las condiciones medias imperantes.

Cuando sobrevienen ciclos plurianuales de déficit hídrico se asiste a una colonización de las zonas deprimidas por las quenopodiáceas leñosas, al desaparecer, durante un período suficiente, las condiciones de anoxia prolongada que impiden su establecimiento. Los helófitos, que normalmente ocupaban estas zonas, dejan de producir vástagos o lo hacen en escasa proporción, permaneciendo fundamentalmente en la forma resistente (rizoma) en espera de años más húmedos. Por el contrario, cuando sobrevienen ciclos húmedos, se produce la erradicación de las poblaciones de quenopodiáceas leñosas y el predominio de los helófitos en las zonas deprimidas.

A medio y largo plazo, sin embargo, lo relevante es la existencia de tendencias subyacentes bajo las fluctuaciones naturales de distintos períodos. Tras la merma (a menos de un tercio) de los aportes superficiales de agua que recibía la marisma hace cincuenta años, las quenopodiáceas leñosas han podido colonizar nuevas zonas. Esa ocupación ha contribuido al paulatino acondicionamiento del sustrato, al atrapar sedimentos en suspensión y propiciar la elevación gradual del nivel, en cantidad suficiente para garantizar su posterior supervivencia durante los ciclos húmedos. Se forman, de este modo, rodales ligeramente elevados que permiten el establecimiento de plantas herbáceas propias de zonas más elevadas, a modo de islas, en el seno de las zonas inundables.

Las comunidades anuales responden con mayor presteza a los cambios cíclicos en las condiciones del medio, de forma que, de acuerdo con sus rangos ecológicos, migran hacia arriba o hacia abajo en el gradiente de elevación y de inundación, en respuesta a ciclos húmedos o secos, respectivamente; en esa reacción se hallan condicionadas por la composición del banco de semillas del suelo consolidado en los años precedentes.



11. VARIACION A PEQUEÑA ESCALA de las características del ambiente físico y vegetación de la marisma salina de Doñana. La acumulación de agua en las microdepresiones favorece a los helófitos del género *Scirpus* y a los macrófitos anuales sumergidos. Sin embargo, bastan apenas unos centímetros de elevación para que los rodales de *Arthrocnemum* puedan subsistir y favorecer la entrada de otras especies anuales menos resistentes a la inundación.

LUIS CLEMENTE, LUIS-VENTURA GARCIA, JOSE LUIS ESPINAR, JUAN S. CARA Y ADELA MORENO

## El futuro de la marisma de Doñana

No se dispone de un modelo operativo que permita estimar la evolución más probable de las variables del medio físico y de la cubierta vegetal bajo distintos escenarios climáticos o de manejo del agua en la zona. Sin embargo, el análisis de los cambios ocurridos en la marisma durante los últimos siglos y, muy especialmente, durante los últimos cincuenta años, nos faculta para identificar tendencias que pudieran acabar comprometiendo tanto su carácter de reserva biogenética de organismos adaptados a condiciones ambientales peculiares como su ingente producción primaria, esencial para el sostenimiento de la fauna.

Desde la creación del Parque, la fauna vertebrada del mismo ha captado gran parte de la atención y preocupación de los organismos gestores, investigadores y del público en general. Pero difícilmente se podrá garantizar su supervivencia sin avanzar en el conocimiento de las complejas interacciones y delicados equilibrios existentes entre los factores del medio y los productores primarios que alimentan, en última instancia, la singular fauna de la marisma de Doñana. A este respecto, siguen plenamente vigentes los problemas que se planteaban hace ya casi 15 años: la uniformización del régimen hidrosalino, la presión excesiva de herbívoros y la contaminación de origen antrópico.

Vayamos con el primer problema, la uniformización del régimen hidrosalino. A causa de la salinización progresiva del suelo, por alteración del régimen natural de circulación y evacuación del agua en la zona, o a causa de la inundación excesiva, por embalsamiento artificial del agua por encima de la cota natural de desagüe, se está produciendo una homogeneización del



12. LAS AGUAS DULCES que drenan desde las arenas de Doñana revisten suma importancia para el mantenimiento de las comunidades perennes del borde de la marisma; permiten la pervivencia de especies no adaptadas a las fluctuaciones en el régimen hidrosalino propias de las zonas del interior de la marisma.

medio físico de la marisma y, como consecuencia, una pérdida en la biodiversidad.

La evaluación de los cambios ocurridos en los principales grupos de vegetación perenne hasta 1991 permite relacionar el incremento artificial de la superficie inundada, la degradación de las plantas asociadas a las quenopodiáceas leñosas de las zonas elevadas y la extensión de una especie (*Juncus subulatus*) mejor adaptada a sustratos salinos con inundación somera y fluctuante. Los cambios en la vegetación, asociados al excesivo embalsamiento de agua por sobreelevación del nivel máximo de inundación, pueden resumirse en dos principales.

Un primer cambio concierne a la pérdida en la heterogeneidad espacial con atenuación de los gradientes naturales. Por un lado, se produce una tardía compartimentación de la lámina de agua que influye en la variabilidad necesaria para acoger diferentes comunidades de plantas acuáticas sumergidas y, por otro, se reduce considerablemente el espacio disponible para el desarrollo del pastizal de las zonas elevadas; al propio tiempo, existe un desplazamiento de la superficie ocupada por *Juncus*, en las quebradas, con respecto a *Arthrocnemum* en solitario, en los paciles.

El segundo cambio se refleja en la dinámica del agua. Aunque se ha incrementado el período de inundación de las zonas deprimidas, su dinámica ha pasado de un flujo prácticamente continuo a otra de tipo casi endorreico. El tránsito repercute en la intensidad de lavado de los primeros centímetros de sedimentos, condicionando las características del sustrato y de la columna de agua que son aspectos clave para el establecimiento y persistencia de comunidades de *Scirpus* y para el desarrollo de distintas especies de plantas acuáticas sumergidas.

Se están evaluando los cambios en los niveles de salinidad del suelo operados durante los últimos 15 años para detectar eventuales procesos de acumulación salina que puedan motivar la desaparición de las comunidades más productivas de las zonas inundables.

La pérdida de los originales aportes fluviales a los caños, que prolongaban la humectación y facilitaban el lavado de las sales de los cauces, explica la desaparición de especies de *Thypha* y *Phragmites* que no toleran períodos de sequía prolongados. Se está investigando, así mismo, el posible carácter relicto de muchas de las poblaciones de *Scirpus*, dada la enorme dificultad que parece existir para el establecimiento de estas especies mediante semillas, en las condiciones hoy imperantes, y su resistencia a establecerse en áreas artificialmente removidas o excavadas.

## Presión de herbívoros

Numerosos indicadores apuntan en la dirección de que la marisma de Doñana puede estar sufriendo una excesiva presión de herbívoros, de la ganadería sobre todo, lo que podría incidir en la pervivencia de muchas especies palatables, comprometer los procesos de crecimiento-asimilación que permiten el mantenimiento de los helófitos e influir negativamente en la potencialidad del sustrato.

La concentración de aves que se sustentan de la vegetación, propiciada por la reducción de la superficie conservada de marismas a menos de un 20 % de su extensión original, y la proliferación de grandes herbívoros silvestres intensifican los cambios en el medio físico. Preocupación que se funda en un

| Año | 1956 | 1977 | 1991 |
|---|---|---|---|
| Paciles (*Arthrocnemum*) | – | 2287 ha | 1225 ha |
| Quebradas (*Juncus-Arthrocnemum*) | – | 501 ha | 1557 ha |
| Marisma baja (*Scirpus*) | 815 ha | 1022 ha | 1064 ha |
| Lucios (sin vegetación perenne) | 2284 ha | 1986 ha | 1828 ha |

13. EVOLUCION TEMPORAL de las superficies ocupadas por las principales unidades de vegetación, en 6000 hectáreas de la zona sur de la marisma de Doñana.



sólido estudio reciente, si bien no cabe tampoco una solución simplista a este problema, en tanto que la herbivoría moderada contribuye al mantenimiento de la diversidad y productividad vegetal en el ecosistema de marismas. Una eliminación radical de alguna de estas influencias pudiera dar lugar a cambios imprevisibles en la evolución de la cubierta vegetal.

## La acción del hombre

Junto con la amenaza que representan los vertidos agrícolas del entorno para los suelos y vegetación de la marisma, persistía desde hace años el riesgo derivado de los aportes de metales pesados al río Guadiamar. En la primavera de 1998, una cadena de hechos fortuitos terminaron por materializar la amenaza en forma de riada tóxica que, a duras penas, logró detenerse en el mismo límite norte de la marisma del Parque Nacional.

No obstante lo anterior, datos recientes parecen indicar que la marisma conserva la huella de una actividad humana milenaria en el entorno. Hay pruebas de que parte de los suelos de las zonas inundables presentan niveles significativos de contaminación por elementos traza (arsénico, en concreto) y de que dichos elementos se transfieren, al menos, a los primeros niveles de las cadenas tróficas.

Se están volviendo a analizar muestras de suelos tomadas 15 o 20 años atrás. Los primeros resultados parecen indicar que la contaminación del interior del Parque nada tiene que ver con el accidente de las minas de Aznalcóllar. Es posible que las mismas actividades humanas cuenca arriba que, al menos desde la época romana, favorecieron la colmatación acelerada del antiguo lago Ligur, hayan contribuido a la contaminación del río Guadiamar y, a través del mismo, a parte de los sedimentos y plantas de nuestra zona húmeda más emblemática.

En la actualidad, se lleva a cabo un estudio que abarca el conocimiento de las tasas de sedimentación de la marisma durante el último medio siglo, la evolución de los suelos, en particular la dinámica del horizonte sálico (horizonte de acumulación de sales) y la evolución de la distribución geográfica de las asociaciones vegetales más productivas. Este estudio podría sentar las bases de la regeneración de la marisma y su conservación.

## Los autores

**Luis Clemente, Luis-Ventura García, José Luis Espinar, Juan S. Cara** y **Adela Moreno** constituyen un grupo de investigación en el departamento de geoecología del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC), dedicado al estudio del medio físico y su relación con las comunidades vegetales. En esa línea, llevan más de 25 años estudiando la evolución de las características del medio físico y la vegetación en el espacio natural de Doñana, sobre el que han publicado más de 40 trabajos en revistas nacionales e internacionales. En la actualidad, colaboran en el estudio de los suelos afectados por la marea tóxica de Aznalcóllar y desarrollan varios proyectos de investigación sobre la tendencia evolutiva del medio físico y la vegetación natural en el Parque Nacional de Doñana y la regeneración de zonas de marisma recientemente restauradas en el marco del Plan Doñana 2005.

## Bibliografía complementaria

SUELOS DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. L. Clemente, L. V. García y P. Siljeström. Ministerio de Medio Ambiente; 1998.

GEOMORFOLOGÍA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. A. Rodríguez. Ministerio de Medio Ambiente; 1998.

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS GRANDES HERBÍVOROS EN LA MARISMA Y VERA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. R. C. Soriguer, A. Rodríguez, L. Domínguez. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid; 2001.

ECOLOGÍA DE LAS COMUNIDADES DE GRANDES HELÓFITOS DE LA MARISMA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA. J. L. Espinar. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla; 2004.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

## El arte del rebote



En 1992, una piedra rebotó 38 veces en la superficie de un lago. Coleman McGhee, de Estados Unidos, establecía así la nueva marca mundial de rebotes sobre el agua. En 2002, el físico francés Lyderic Bocquet, espoleado por su hijo, analizó la física del rebote. Vamos a basarnos en su trabajo para estudiar cómo rebotan las piedras en el agua. Examinaremos los factores del éxito: la velocidad de lanzamiento, la inclinación del canto y la velocidad de rotación. ¿Acaso podremos batir el récord?

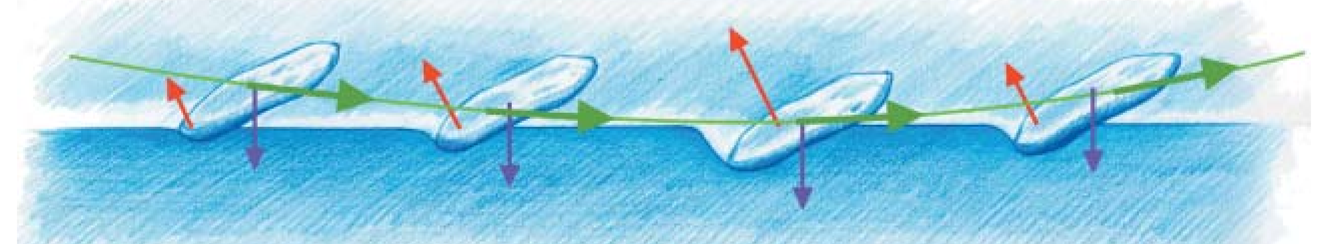
Volvamos a la piedra: ¿Cuál es la fuerza que proporciona el muelle que la hace rebotar? La práctica enseña que el canto debe lanzarse con una velocidad bastante alta e inclinándolo un poco hacia atrás. Si el lanzamiento es rasante, el canto se deslizará unos instantes sobre el agua, como un esquiador acuático, se frenará y hundirá: más denso que el agua, no puede flotar, pues el empuje de Arquímedes no compensa su peso. Una fuerza de sustentación similar a la que se ejerce sobre un ala de avión es la que le permite seguir suspendido. Es proporcional a la densidad del agua multiplicada por la superficie con que el objeto toca el agua y por el cuadrado de su velocidad. Para los objetos planos, el coeficiente de proporcionalidad es cercano a 0,5. Igualando esta fuerza de sustentación al peso, se determina el orden de magnitud de la velocidad horizontal mínima necesaria para que el objeto se sostenga sobre el agua.

### Para moverse sobre el agua...

...es necesario no pesar demasiado y desplazarse muy rápido. El basilisco, un lagarto suramericano, corre por la superficie del agua pero pesa sólo un centenar de gramos. ¿Qué pasa con un hombre de 80 kilogramos que desee practicar el *barefoot*, es decir, esquiar sobre el agua con la planta de los pies como esquíes? Si la superficie de las dos plantas de los pies suma 350 centímetros cuadrados, sale una velocidad del orden de 25 kilómetros por hora. En realidad, se acerca más a los 60 kilómetros por hora. Nuestra estimación da, pues, una velocidad del orden de la mitad de la requerida. Sólo podremos desplazarnos por encima del agua si nos arrastra un barco a gran velocidad.

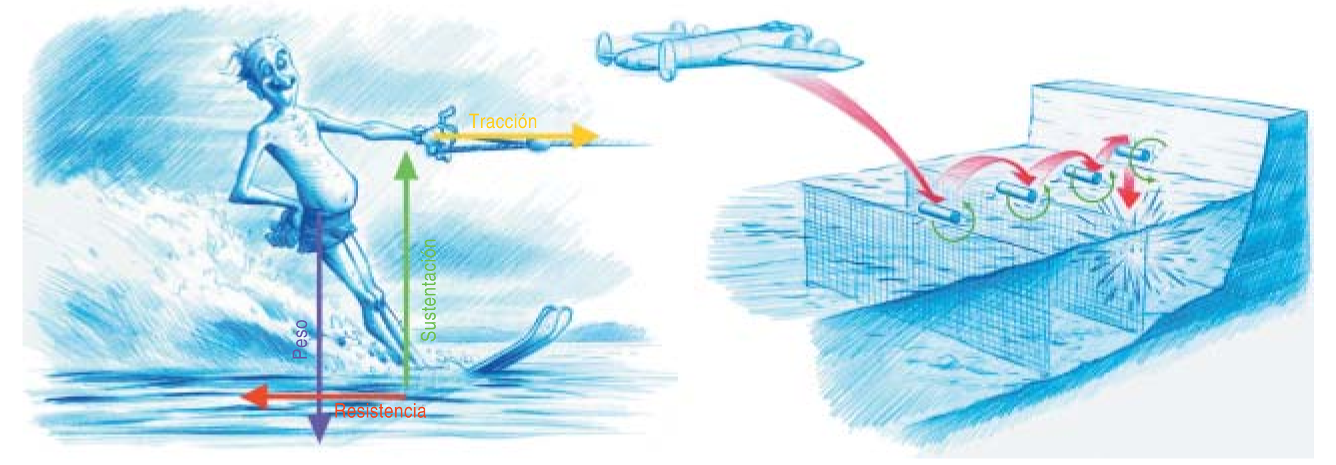
¿Qué pasará con un canto que pese bastante, digamos que 200 gramos, con forma de disco aplastado y 5 cm de radio? El cálculo nos da una velocidad mínima de sólo 2,5 kilómetros por hora. A una velocidad mayor que ésa, la fuerza de sustentación supera el peso y el canto rebota. Cuando la piedra, levemente inclinada, roza la superficie del agua, sólo la toca con la parte posterior. La superficie de contacto, y por tanto la sustentación, es muy pequeña. A medida que la piedra inclinada se hunde en el agua, aumenta la superficie de contacto y con ello la sustentación: así pues, la fuerza de sustentación es proporcional al hundimiento de la piedra en el agua. El agua se comporta como un muelle cuya rigidez fuese proporcional al cuadrado de la velocidad horizontal. Rebotando en ese muelle, el canto salta en sentido contrario y sale del agua.

Con una velocidad elevada, ese mecanismo hará que cualquier objeto rebote en el agua. Durante la Segunda Guerra Mundial, los aliados lo aprovecharon para destruir una presa en el río Mohne, en el valle del Ruhr. Era imposible recurrir a un bombardeo clásico, pues la destrucción del edificio necesitaba una explosión profunda en el seno del agua y contra la pared. En cuanto a los torpedos, habrían sido detenidos por las redes de protección colocadas por la Wehrmacht. La solución ideada por el ingeniero inglés Barnes Wallis consistió en hacer rebotar unas bombas cilíndricas en la superficie del embalse hasta la pared de la presa. Las bombas fueron lanzadas desde una altura de 18 metros por aviones que volaban a 400 kilómetros por hora. Con una masa de más de cuatro toneladas, las bombas rebotaron varias veces sobre el agua, apenas hundiéndose mientras el muelle hidrodinámico se mantuvo activo. Pasaron así por encima de las redes de protección y recorrieron los aproximadamente 400 metros que las separaban de la presa. Al chocar con la pared, se deslizaban por ésta hacia el fondo, donde estallaban.



BRUNO VACARO

1. Cuanto más se hunde el canto, mayor es la fuerza hidrodinámica: el agua se comporta como un muelle. Esa fuerza se ejerce sobre la parte posterior del canto y tiende a hacer que bascule hacia adelante. Por tanto, hay que estabilizar la orientación de la piedra imprimiéndole un giro sobre sí misma.




2. El esquiador se mantiene sobre la superficie del agua gracias a una fuerza de sustentación que equilibra su peso. La resistencia puede alcanzar valores equivalentes al peso del esquiador.

3. Los aliados destruyeron una presa alemana haciendo rebotar sobre al agua bombas de varias toneladas de peso. El giro rápido sobre sí misma de cada bomba mantenía su orientación.

### Estabilizar la inclinación

Con una velocidad suficiente y una orientación controlada, ya hemos hecho rebotar el canto. Para que los rebotes posteriores se efectúen en las mismas condiciones, debemos conseguir que la piedra incida cada vez en el agua casi de plano. Durante el rebote, la fuerza hidrodinámica se ejerce esencialmente en la parte posterior de la piedra y ésta tenderá por ello a bascular hacia adelante. Para evitar ese movimiento, el lanzador saca partido del efecto giroscópico, que puede resumirse así: cuando un objeto gira rápidamente, cuesta más hacerle cambiar de orientación que cuando no gira.

En efecto, observemos una peonza. Levemente inclinada e inmóvil, caerá si la soltamos de la mano. Démosle en cambio un movimiento lento de rotación sobre sí misma: caerá, pero mucho menos deprisa que antes. Hagamos, por último, que gire muy velozmente. Ya no se caerá; permanecerá erguida sobre la punta, desafiando la gravedad. Adaptando el análisis de la peonza al problema del rebote, es posible determinar la velocidad mínima de rotación que permite estabilizar la orientación de la piedra. Para nuestro disco plano, esa velocidad mínima de rotación es igual a la raíz cuadrada de la aceleración de la gravedad dividida por el radio de la piedra, o sea, dos vueltas por segundo para una piedra de cinco centímetros de radio.

Por último, para batir el récord, habrá que vencer el obstáculo más temible, las pérdidas de energía. El agua somete a la piedra no sólo a la fuerza de sustentación, sino también a una resistencia al avance que la irá frenando. Analicemos primero la situación cuando la piedra se desliza por el agua: como en un ala de avión, la fuerza de resistencia es proporcional a la sustentación. Sin embargo, mientras que en un planeador la resistencia al avance vale sólo un vigésimo de la sustentación, en el caso de la piedra ambas fuerzas son más o menos iguales. Como la sustentación equilibra el peso, la resistencia al avance es también igual al peso: en la horizontal ocurre lo que habría sucedido si hubiéramos lanzado la piedra verticalmente: la aceleración es constante, opuesta a la velocidad e igual al peso de la piedra. La distancia recorrida por la piedra será, pues, igual a la altura que alcanzaría la piedra lanzada hacia arriba con la misma velocidad inicial.




### Ni demasiado alto ni demasiado bajo

¿Qué pasa ahora con el rebote? La fuerza de sustentación es nula mientras la piedra está en el aire y mayor que el peso durante el rebote. No obstante, gracias a la naturaleza elástica del choque entre dos rebotes la piedra retornará siempre, más o menos, a su altura inicial: la fuerza de sustentación compensa en promedio el peso exactamente, como en la fase de deslizamiento. La resistencia al avance es así idéntica en promedio a la existente en el deslizamiento. Significa ello que la distancia recorrida por la piedra antes de hundirse depende únicamente de la velocidad horizontal inicial y no del número de rebotes. Como la duración total de la suspensión es invariable, resulta esencial lanzar la piedra horizontalmente y lo más bajo posible. Si se la lanza desde una altura excesiva o si llega al agua demasiado inclinada, rebotará alto, los rebotes estarán más espaciados y la distancia límite se alcanzará en pocos rebotes. Al contrario, cuanto más horizontal y próximo al agua sea el lanzamiento, más reducida será la amplitud de los rebotes y más rápidamente se sucederán y, para una distancia dada, tanto mayor será su número.

En realidad, el choque con el agua no es perfectamente elástico: en cada rebote, disminuye la altura de rebote. Como una bola lanzada contra el suelo, la piedra dejará de rebotar al cabo de un tiempo finito: los rebotes cesan cuando la altura de rebote se hace menor que el hundimiento de la piedra. Si el tiempo al cabo del cual cesan los rebotes es menor que el tiempo que la piedra invierte en pararse, ésta seguirá su camino deslizándose antes de hundirse: es lo que se observa si la piedra se lanza muy baja. Lo ideal, por lo tanto, es ajustar la altura de lanzamiento de modo que ambos tiempos coincidan.

Recapitulemos: una velocidad horizontal lo mayor posible, un pequeño movimiento de rotación y un lanzamiento plano desde una altura conveniente. Siguiendo estos consejos, puede que logremos alcanzar la marca mítica, nunca homologada, de los infinitos rebotes. En una competición celebrada en día brumoso, una de las piedras fue a perderse en la niebla. En ausencia de información adicional, el jurado declaró vencedor a su lanzador atribuyéndole infinitos rebotes. Prudentes, las instancias de este deporte no han homologado semejante récord.

# JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

## Matemáticas electorales

Los días siguientes a las elecciones generales siempre se oye y se lee acerca de las arbitrariedades y agravios del sistema electoral: cómo un diputado requiere menos votos en determinadas provincias, cómo tal formación tiene cinco veces más votos que otra pero la mitad de diputados, etc. Las críticas giran sobre todo en torno a la *regla D'Hont*. Señala ésta cómo asignar los escaños de cada provincia a los partidos políticos según el número de votos recibidos. La regla D'Hont es una de las posibles soluciones del *problema de reparto*, que encontramos en cualquier situación en la que deba repartirse algo formado por unidades indivisibles (los diputados del congreso).

Supongamos que tres partidos políticos, A, B y C, han obtenido, respectivamente, 300, 140 y 60 votos, en una provincia a la que corresponden cinco diputados. La fracción de votos del partido A es 300/500 = = 0,6. Su representación en el parlamento debería ser proporcional; es decir, lo más justo es que alcanzara 0,6 × 5 = 3 diputados. Hasta aquí el reparto va bien. Pero la fracción de votos del partido B es 140/500 = = 0,28 y le corresponden 0,28 × 5 = 1,4 diputados. Finalmente, al partido C le corresponden (60/500) × 5 = = 0,6 diputados.

Ahora bien: no puede haber diputados fraccionarios. Hay que aproximar el reparto a números enteros. (Podría considerarse un parlamento en el que el valor del voto de los diputados fuera fraccionario, pero semejante posibilidad supondría una complicación excesiva en el funcionamiento de la cámara). El número fraccionario de diputados que le correspondería a cada partido se denomina *cuota de reparto*. En nuestro ejemplo, la cuota de reparto de A es 3, la de B es 1,4 y la de C es 0,6. El problema del reparto consiste en diseñar un método que aproxime estos números a números enteros. Podríamos pensar en redondearlos, procedimiento habitual en las ciencias experimentales: si la parte decimal de la cuota de reparto es inferior a 0,5, redondeamos al entero inferior y si es superior a 0,5, redondeamos al entero superior. Con este método, al partido A le corresponderían 3 diputados, al B 1 diputado y al C 1 diputado. Pero ocurre que no siempre la suma de las cuotas redondeadas es igual al número de diputados a repartir.

Veámoslo. Con los resultados de la tabla siguiente, si pretendemos repartir cinco escaños:

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | CUOTA DE REPARTO | ESCAÑOS |
|---|---|---|---|
| A | 230 | 2,3 | 2 |
| B | 140 | 1,4 | 1 |
| C | 130 | 1,3 | 1 |

hay un escaño que queda sin repartir. El redondeo de las cuotas no resuelve, pues, el problema del reparto.

Un método que sí lo soluciona es el de Hamilton, o de las partes decimales mayores. En este método, se asigna a cada partido un número de escaños igual a la parte entera de su cuota. Tras ese primer reparto, quedarán por asignar algunos escaños; se atribuirán, uno a uno, a los partidos cuya cuota alcance la mayor parte decimal. Con los datos iniciales, el método de Hamilton funcionaría de la siguiente forma:

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | CUOTA DE REPARTO | PARTE ENTERA | ESCAÑOS |
|---|---|---|---|---|
| A | 300 | 3,0 | 3 | 3 |
| B | 140 | 1,4 | 1 | 1 |
| C | 60 | 0,6 | 0 | 1 |

En la primera asignación hemos repartido sólo 4 escaños, 3 para A y 1 para B. El escaño que sobra se asigna al partido cuya cuota tenga la mayor parte decimal. En este caso es el C, cuya parte decimal es 0,6, superior a 0,0 (parte decimal de la cuota de A) y a 0,4 (parte decimal de la cuota de B). El método de Hamilton parece justo a primera vista. Sin embargo, presenta una grave deficiencia. Para sacarla a la luz, veamos qué ocurre si, en vez 5 escaños, se trata de repartir 12. La tabla es entonces (recordemos que la cuota de un partido con $x$ votos es ahora $(x/500) \times 12$):

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | CUOTA DE REPARTO | PARTE ENTERA | ESCAÑOS |
|---|---|---|---|---|
| A | 300 | 7,2 | 7 | 7 |
| B | 140 | 3,36 | 3 | 3 |
| C | 60 | 1,44 | 1 | 2 |

El escaño que queda sin repartir con las partes enteras se va al partido C, porque tiene la cuota con parte decimal mayor (0,44). Si repartimos 13 escaños, la tabla sería:

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | CUOTA DE REPARTO | PARTE ENTERA | ESCAÑOS |
|---|---|---|---|---|
| A | 300 | 7,8 | 7 | 8 |
| B | 140 | 3,64 | 3 | 4 |
| C | 60 | 1,56 | 1 | 1 |

ya que los escaños sobrantes pasan a los partidos A y B. Para nuestra sorpresa, el partido C posee ahora menos escaños que antes, pese a haber aumentado el nú-

mero total de escaños. Tal situación, conocida por *paradoja de Alabama*, se dio en un estudio sobre la asignación de escaños a los distintos estados de EE.UU. en 1880, lo que condujo al congreso a adoptar otro método de reparto en 1901. Sin embargo en España el reparto de escaños por provincias sigue haciéndose mediante el método de Hamilton. Finalmente, el método de Hamilton adolece de un segundo inconveniente. En ocasiones, el aumento de votos de un partido, manteniéndose constante el número de votos del resto, puede determinar que dicha formación política vea mermada su representación parlamentaria: se trata de la *paradoja de la población*. Lo deseable sería un método exento de ambas paradojas.

La famosa regla D'Hont, que en EE.UU. se conoce como método de Jefferson, se halla libre de tales deficiencias. La regla D'Hont consiste en elegir un común divisor *d* que divide el número de votos conseguido por cada partido. Los números resultantes se redondean por abajo, es decir, eliminando la parte decimal. Se obtiene, así, un número de escaños asignados cuyo total puede o no ser igual al número total de escaños a repartir. Se ajusta entonces el divisor *d*, de modo que coincidan ambos números. ¿Cómo actúa en nuestro ejemplo si queremos repartir cinco escaños? Probemos, por ejemplo, los tres divisores $d = 50$, 75, 100 y calculemos los cocientes:

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | $d = 50$ | $d = 75$ | $d = 100$ |
|---|---|---|---|---|
| A | 300 | 6 | 4 | 3 |
| B | 140 | 2,8 | 1,87 | 1,4 |
| C | 60 | 1,2 | 0,8 | 0,6 |

Vemos que el divisor 50 da lugar al reparto 6, 2, 1, es decir, un total de 9 escaños, que es mayor que los cinco escaños a repartir. El divisor 100, por el contrario, resulta demasiado alto, ya que conduce al reparto 3, 1, 0, cuyo total es 4. El divisor 75 produce el reparto deseado: 4,1,0, que suman un total de cinco escaños.

Pero el método D'Hont tiene un serio problema. Recordemos que la cuota de reparto del partido A es exactamente 3. Sin embargo, la regla D'Hont le ha otorgado 4 escaños. Lo deseable sería que cualquier método asignase a todos los partidos un número de escaños que fuese o bien el entero inferior a su cuota o el entero inmediatamente superior a su cuota. Por ejemplo, si la cuota es 2,9, el partido debería obtener como máximo 3 escaños y como mínimo 2. Esta propiedad se llama *condición de la cuota* y parece lógico exigir que cualquier método justo la cumpla.

Ahora bien, el método D'Hont no la satisface, según hemos visto. ¿Deberíamos por ello desecharlo? La respuesta no es sencilla. Balinski y Young demostraron en 1960 que no existe ningún método que verifique la condición de la cuota y que esté exento de las paradojas de la población y de Alabama. Estos matemáticos demostraron, por tanto, que no existe un método de reparto perfecto. Hay que sacrificar siempre algo y ese sacrificio constituye ya una decisión política. Muchos piensan que las paradojas de Alabama y de la población son más dañinas que la condición de la cuota y, en consecuencia, defienden el método D'Hont y otros métodos que utilizan un divisor común.

Los métodos del divisor común se basan en el mismo principio que el D'Hont. Se dividen los votos por un divisor común *d*. Los métodos difieren en la forma de redondear los cocientes obtenidos. El *método de Webster*, por ejemplo, los redondea del modo habitual, tomando el entero superior si la parte decimal del cociente es mayor o igual que 0,5. En nuestro ejemplo, el método de Webster daría un reparto 6,3,1 para $d = 50$; 4,2,2 para $d = 75$; y 3,1,1 para $d = 100$. El divisor correcto sería 100 y el reparto final, 3,1,1, diferente del reparto D'Hont. En este caso, el método de Webster sí cumple la condición de la cuota, pero se pueden encontrar otros ejemplos en donde no la verifica.

De los métodos del divisor, ¿cuál es mejor? Como ya hemos dicho, ninguno es perfecto. Sin embargo, puede demostrarse que el D'Hont favorece los partidos con mayor número de votos (en nuestro ejemplo este sesgo es evidente). De hecho, en EE.UU. lo propuso Jefferson porque su estado, Virginia, era el más poblado en 1790. Este sesgo hacia partidos grandes ha sido muy controvertido en nuestro país. Por otro lado, también Balinski y Young demostraron en 1980 que el único método que carece de sesgos hacia partidos con más, o con menos, votos es precisamente el de Webster. Quizás éste último sea un método de reparto a considerar para nuestro sistema electoral.

Algunos lectores quizá se hayan sorprendido de la exposición que hemos hecho aquí de la regla D'Hont. Habitualmente se explica del siguiente modo. Se divide el número de votos de cada partido por 1, 2, 3, ..., *n*, siendo *n* el número de escaños a repartir. De todos esos cocientes se eligen los *n* mayores y se obtiene así el reparto (en nuestro país, además, se eliminan antes de hacer esta tabla los partidos con un porcentaje de votos inferior al 3 %). En nuestro ejemplo la tabla de cocientes sería:

| PARTIDO | NUMERO DE VOTOS | votos/2 | votos/3 | votos/4 | votos/5 |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 300 | 150 | 100 | 75 | 60 |
| B | 140 | 70 | 46,67 | 35 | 28 |
| C | 60 | 30 | 20 | 15 | 12 |

Los cinco cocientes mayores son: 300, 150, 140, 100 y 75. Cuatro de ellos en la fila del partido A y 1, en la del B. Por tanto, el reparto es 4,1,0, que coincide con el que hemos hallado utilizando el método del divisor. El lector puede demostrar que esta forma de hallar el reparto D'Hont es equivalente a la del divisor.

Hemos visto sólo una pequeña parte de las matemáticas electorales. Si desean profundizar más en ellas, les recomiendo la página web "La elección social: un sueño imposible", de Bartolomé Barceló, profesor de la Universidad Autónoma de Madrid (http://www.uam.es/bartolome.barcelo/curso.html).

Mark Fischetti

## RELOJES DE CUARZO

# Relojes de piedra

Al pisar un trozo de cuarzo sobre el suelo, seguro que no se nos ocurre que uno de los cristales de la piedra tallado en forma de diminuto diapasón podría ser la pieza clave del reloj que marca los segundos en nuestra muñeca.

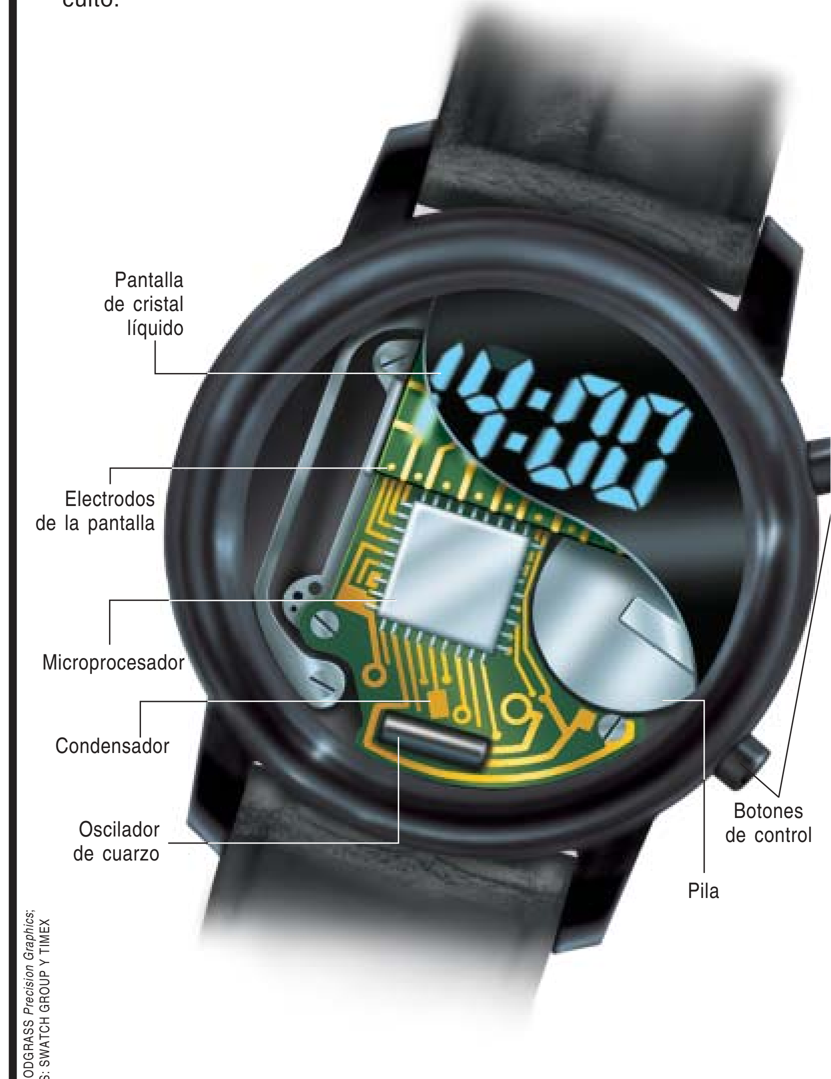
Casi el 90 por ciento de los relojes modernos son electrónicos. En ellos, la pila suministra la energía que mueve las manecillas o activa la pantalla de cristal líquido, pero son los osciladores de cuarzo —en esencia, diapasones vibrantes— a los que se debe el batido regular de los cronómetros. "Incluso un reloj de cuarzo barato ofrece una precisión elevada: el desajuste es de uno o dos segundos al mes", dice Lou M. Galie, vicepresidente de investigación y desarrollo de Timex. "Mucho más preciso que un reloj mecánico de los caros".

Desde el Renacimiento, el movimiento de las manecillas de los relojes ornamentales corrió a cargo de ruedas dentadas y volantes interconectados, accionados por péndulos, contrapesos o resortes tensados a mano. A comienzos del siglo XIX, los artesanos suizos ya fabricaban complejos relojes de pulsera y fundaban empresas que dominarían el mercado durante más de un siglo. Los relojes ornamentales de cuarzo empezaron a comercializarse en torno a 1940 y unos abultados relojes de pulsera tantearon el mercado en los años sesenta; pero la mayoría de los fabricantes consideraba esa técnica mera curiosidad. Unas pocas firmas suizas perfeccionaron los diseños. Las empresas japonesas, sin embargo, miniaturizaron el oscilador, la pila, el motor y los circuitos y se adueñaron del mercado en la década de 1970. Los fabricantes tradicionales tardaron 20 años en recuperarse y sumarse a la nueva corriente.

Los relojes mecánicos, más refinados que nunca, se limitan ahora a un carísimo mercado de lujo. Los relojes de cuarzo deben su bajo precio a los circuitos integrados y su superior precisión a la elevada frecuencia de 32.768 vibraciones por segundo del oscilador. En los relojes mecánicos, el ritmo lo marca un volante que oscila, típicamente, a cinco batidos (adelante y atrás) por segundo.

Los osciladores de cuarzo fueron empleados en la década de 1930 por los militares para dotar de precisión a la cronometría de los equipos de navegación. Actualmente, Swatch y varias firmas japonesas suministran al mundo la mayoría de los osciladores de diapasón.

**1. LOS RELOJES DE CUARZO DIGITALES** funcionan al compás que marca un oscilador de cristal activado por la tensión de una pila. Los impulsos, a su vez, generan una tensión que realimenta al diapasón para que éste resuene a 32.768 vibraciones por segundo. Las vibraciones regulan un microprocesador encargado de actuar sobre los electrodos que dan forma a los números que aparecen en la pantalla de cristal líquido. Los condensadores y otros componentes electrónicos compensan el error de realimentación en el circuito.




KENT SNODGRASS *Precision Graphics*; FUENTES: SWATCH GROUP Y TIMEX

## ¿SABIA USTED QUE...?

➤ **¿SIN PILAS?:** Más del 95 por ciento de los relojes de cuarzo funcionan con pilas. Las primitivas duraban como mucho 18 meses; ahora, las mejores llegan a los 10 años. Por ironía de las cosas, la corriente que producen las células fotovoltaicas de los relojes que funcionan con energía solar se emplea para recargar una pila instalada en su interior, aunque algunos modelos almacenan la energía en un supercondensador.

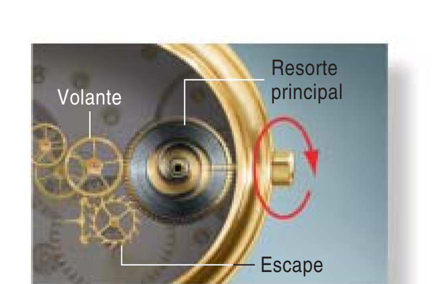
➤ **PROGRAMAR:** El microprocesador de un reloj digital de diez euros es más potente que el procesador del Apple II que generalizó el uso de los ordenadores personales en torno a 1980. Aquel año, recuerda el vicepresidente Lou M. Gallie, Timex no empleaba ningún experto en software; sin embargo, actualmente más de la mitad del personal técnico está integrado por programadores.

➤ **COMPLICACIONES:** A funciones de hardware suplementarias, calendarios, por ejemplo, los fabricantes de relojes las llaman "complicaciones". En 1783, el amante de María Antonieta encargó a Abraham Breguet el más complicado de los relojes personales hasta entonces concebido. Para cuando estuvo acabado, la reina ya había sido decapitada. En 1927, el magnate de la industria automovilística James Packard pagó 2500 dólares por un reloj de pulsera que indicaba la posición de las estrellas desde su casa de Ohio.

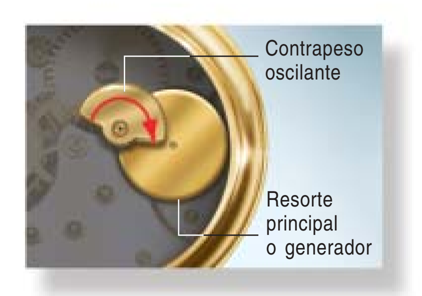
➤ **CUARZO Y MAS CUARZO:** Los diminutos diapasones de cuarzo proporcionan las frecuencias de referencia a millones de chips de ordenadores, teléfonos celulares, transmisores de radio, transceptores de satélite y sintetizadores de música. Cuanto más cortos sean los dientes, más alta la frecuencia.

Pila
Ruedas y volantes
Circuito integrado
Oscilador de cuarzo (hermético)
Corona (ajusta las manecillas)
Motor de paso a paso
Condensador

**2. EN LOS RELOJES DE CUARZO ANALOGICOS** se emplean el mismo oscilador y el mismo circuito de realimentación que en los modelos digitales, pero unos circuitos integrados reducen el ritmo exactamente a dos vibraciones por segundo. Estas arrancan y paran un motor de paso a paso, el cual mueve y detiene al segundero con cada tictac.




**3. LOS RELOJES MECANICOS DE CUERDA** se ponen en marcha girando la corona, con lo que se arrolla el resorte principal. Se almacena así una energía que se libera en pequeñas cantidades merced a un escape. La cronometría la proporciona un volante rotatorio.




**4. LOS RELOJES AUTOMATICOS** (llamados también dinámicos o de cuerda autónoma) son accionados por un contrapeso desequilibrado que oscila con el movimiento del brazo del usuario. Esta oscilación activa el generador de un dispositivo de cuarzo o arrolla el resorte principal mediante un movimiento mecánico.

Cuarzo
Electrodo

**5. LOS OSCILADORES** se fabrican de cuarzo sintético. Mediante fotolitografía se les da forma de diapasón. Los primitivos se hacían mecanizando cristales naturales. Dado que el cuarzo es un material piezoeléctrico, vibra cuando se aplica una tensión eléctrica a sus electrodos chapados en oro.

# LIBROS

## Teoría cuántica

### *Véterotestamentaria*

THE HILBERT CHALLENGE, por Jeremy J. Gray. Oxford University Press; Oxford, 2000.

ARNOLD SOMMERFELD. Wissenschaftlicher Briefwechsel. Deutsches Museum; Múnich, 2000.

THE COLLECTED PAPERS OF ALBERT EINSTEIN. Volume 7. The Berlin Years: Writings, 1918-1921. A cargo de Diana Kormos Buchwald et alii. Princeton University Press; Princeton, 2002.

NO TIME TO BE BRIEF, por Charles P. Enz. Oxford University Press; Oxford, 2002.

"Véterotestamentaria" se llamó a la mecánica cuántica pergeñada por Niels Bohr y Arnold Sommerfeld que llevó a su culminación Wolfgang Pauli. Siguiendo la metáfora bíblica, tan cara a sus protagonistas, la "Nueva Tierra" sería la teoría cuántica, matricial y ondulatoria, esbozada, respectivamente, por Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, en cuyo desarrollo y estructuración desempeñó también Pauli un papel decisivo.

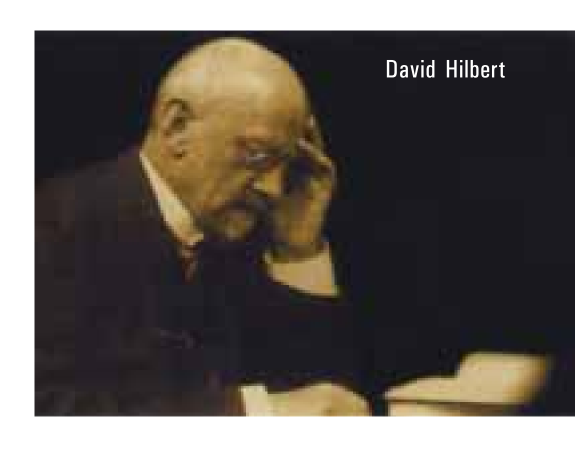
Conocida es la relación de la teoría de la relatividad con la nueva geometría; menos divulgada aparece la vinculación de la física cuántica, antigua y nueva, con la matemática. El mismo año en que nació Pauli y descubriera Max Planck el cuanto de acción $h$, esto es, en 1900, un David Hilbert maduro (*The Hilbert Challenge*) aprovechaba la oportunidad que le brindaba el Congreso Internacional de Matemáticos reunidos en París para plantear 23 problemas que compendiaban la situación y las perspectivas de la disciplina; la fundamentación de ésta, núcleo principal de las propuestas, repercutiría en el asentamiento del nuevo enfoque de la mecánica.

Hilbert había nacido, 38 años antes, en Königsberg, donde existía una fuerte tradición matemática que se remontaba a Jacobi. En su universidad trabó amistad con Hermann Minkowski, algo más joven que él, y con Adolf Hurwitz, un poco mayor. Se dice que Hilbert adquirió su base matemática en los largos paseos que daban los tres. Lo cierto es que, andando el tiempo, convertiría ese método peripatético en una parte importante de la educación de sus alumnos.

Le atrajo en un comienzo la teoría de invariantes, verdadera silva en su tiempo que requería una notable potencia de cálculo para moverse con soltura. (Un ejemplo elemental de un invariante es el discriminante $b^2 - 4ac$ de una forma cuadrática.) En 1888 avanzó lo que daría en llamarse *el teorema de la base de Hilbert*, que demostraba la existencia de invariantes por encima del nivel cuadrático y ahorraba cálculos prolijos. Ese hallazgo le sirvió para asegurarse un puesto universitario. Felix Klein le invitó luego a Göttingen, donde ocupó una cátedra de matemática desde 1895 hasta el final de su vida. En 1897 publicó su *Zahlbericht* (1897), tratado que supuso la madurez de la teoría algebraica de números y en el que introdujo la teoría de campos.

Pasó luego a los fundamentos de la geometría, que estableció en su clásico *Grundlagen der Geometrie* (1899). La modelización de la geometría de Euclides por coordenadas de números reales, advirtió, no constituía una prueba de consistencia de la misma, pues había que demostrar primero que la teoría de los números reales era consistente. Se trataba de un problema nada trivial; lo colocó en el segundo lugar de la lista presentada en París. Tras la inesperada muerte de Minkowski en 1909, se enfrascó de manera especial en la relación entre matemática y física: en la búsqueda de ecuaciones más generales para la física, al tiempo que Einstein pugnaba por crear su teoría general de la relatividad. Dentro de la topología, y sirviéndose de su teoría de invariantes, desarrolló el concepto de un espacio de dimensiones infinitas. Sobre este "espacio de Hilbert" bascula la teoría de campos clásica y cuántica.

Alumno de un joven Hilbert en Königsberg fue Sommerfeld (*Arnold Sommerfeld. Wissenschaftlicher Briefwechsel*). Allí le enseñaron física Paul Volkmann y su ayudante Emil Wiechert. De la influencia de uno y otro da testimonio su tesis de grado: *Die Willkürlichen Funktionen in der Mathematischen Physik* (1891), en torno al problema irresuelto de la temperatura de la Tierra, donde Sommerfeld evidenciaba un profundo conocimiento de las series de Fourier. Si con los años sería, en palabras de su discípulo Heisenberg, uno de los "últimos maestros que dominaba toda la física de su tiempo y realizó investigaciones en casi todos los dominios de la disciplina", con Hilbert, en particular, apuntalaría su solvencia matemática desde una inicial correspondencia en torno


David Hilbert

a las ecuaciones hidrodinámicas. En Hilbert se apoyará para su monografía *Ueber einige mathematische Aufgaben aus der Elektrodynamik* (1898).

Para su formación matemática resultó decisiva, sin embargo, su relación con Felix Klein, su mentor y valedor en las primeras etapas docentes que fue cubriendo: ayudantía en Göttingen, profesor en Clausthal y Aquisgrán. En Göttingen prepara su tesis de habilitación que aparece en el *Mathematischen Annalen* (1896), donde aporta una solución de la ecuación de onda. Se dedica en ese tiempo a la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, una de sus herramientas preferidas en la explicación de la física cuántica. Pero el binomio Klein-Sommerfeld va estrechamente ligado a un proyecto imponente: la *Encyklopädie der Mathematische Wissenschaften*, que el primero dirigió a lo largo de 30 años. De acuerdo con el plan de Klein, la enciclopedia debía abarcar no sólo la ciencia matemática, sino también la geodesia, astronomía y física teórica. Le encargó a Sommerfeld la edición del volumen consagrado a la física. Este solicitaría al propio Einstein que redactara el apartado sobre relatividad. Al no poder satisfacer su invitación, se dispuso a escribirla él mismo, al tiempo que recababa la colaboración de su alumno, en Múnich, Pauli. Pero el borrador que éste le entregó, le impresionó tanto, que le asignó la redacción entera del artículo, un acto de extrema confianza, habida cuenta del elenco de autores. Sommerfeld era por entonces presidente de la Sociedad Alemana de Física. Propuso la candidatura de Pauli, que fue elegido miembro de la sociedad en 1919.

Sommerfeld había llegado a Múnich en 1906. A propuesta de Röntgen, cuyo trabajo sobre la radiación había desarrollado años atrás, se le ofreció la cátedra que desempeñara

## Del centro del Sol a la Tierra

**JOURNEY FROM THE CENTRE OF THE SUN**, por Jack B. Zirker. Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2002.

El libro construye una descripción, a la vez precisa y profunda, de cómo es y qué acontece en el Sol siguiendo el viaje de un fotón desde que es producido en su centro, mediante reacciones termonucleares, hasta que llega a su parte más externa y compleja, la atmósfera, que se extiende hasta más allá del planeta Tierra en forma de viento solar. Expone lo que le pasa en este largo trayecto de más de un millón de años. Su influencia sobre su clima forma también parte de este pintoresco viaje, que termina con una interesante descripción de los problemas que tienen planteados los investigadores en este ámbito.



Es de resaltar la forma narrativa. Su autor, Jack Zirker, con un lenguaje ameno consigue explicar la física de los fenómenos que ocurren en el Sol y sus paradigmas con suma claridad, sirviéndose de ejemplos sencillos y sin recurrir al lenguaje matemático que a menudo hacen inaccesible o difícil la lectura. Por tanto, creo que el libro es ideal para la argumentación y discusión científica, desde diferentes puntos de vista y utilizando partes de la física diversas. A costa de perder el carácter preciso y cuantitativo que aporta el lenguaje matemático, se gana en una visión global e integradora para abordar y desarrollar los complejos fenómenos solares. Especialmente interesante es la introducción de temas de reciente investigación, junto a otros que han experimentado un creciente auge en los últimos años, como son los de las técnicas heliosísmicas, los neutrinos solares, las interacciones en plasmas altamente ionizados a alta y baja densidad, los campos magnéticos (en cromosfera, región de transición y corona) y la convección turbulenta, objeto de diferentes capítulos. Los aspectos más complejos que requieren de una explicación más extensa se reúnen en unas notas al final del libro, muy provechosas; al igual que lo es la inclusión de un glosario de palabras y tecnicismos.

Todo ello relatado y aderezado con anécdotas y detalles sobre los científicos involucrados en los descubrimientos y planteamientos teóricos que han hecho posible el actual conocimiento del Sol. Zirker, físico solar en activo, relata sucesos en los que ha sido coprotagonista o los ha vivido en primera línea, especialmente los concernientes a los desarrollados en Estados Unidos. Por otro lado, la obra cuenta con una buena colección de imágenes, que, además de contribuir a una explicación gráfica del viaje mencionado, son de gran belleza plástica.

En definitiva, se trata de una obra escrita con precisión, abundante en detalles y muy actual. Incorpora los últimos descubrimientos hechos a partir de los datos obtenidos por las sondas espaciales YOHKOH, SOHO y TRACE. Pienso que es un libro ideal para profesionales de la ciencia y técnica, no expertos en la materia, que podrán encontrar una buena puesta al día sobre este tema. Asimismo es un libro ideal para la discusión y consulta de problemas relacionados con la física, en general, y la solar en particular, en seminarios con estudiantes de astrofísica y física, así como entre estudiosos y aficionados a la observación solar. Los aficionados y estudiantes que quieran obtener una visión completa y profunda de lo que ocurre en el Sol, y por ende en muchas de las estrellas que pueblan nuestro universo, encontrarán lo que buscan en esta obra.

—TEODORO ROCA CORTÉS

Ludwig Boltzmann. "En Múnich tuve la ocasión de dar cursos por primera vez de física teórica y clases especiales sobre cuestiones de interés actual. Me propuse no ahorrar ningún esfuerzo por establecer, a través de seminarios y coloquios, un plantel de física teórica", así describe en su *Esbozo Autobiográfico* el origen de la famosa escuela de física, de la que saldrían Bethe, Debye, Heisenberg, Heitler y Pauli, entre otros.

Fue un catedrático cabal. Su docencia cubría toda la física clásica en un ciclo de tres años, con una clase de problemas a cargo de su ayudante, en un comienzo Debye y, luego, Peter Paul Ewald, en tiempos de Pauli. Además del ciclo, que incluía la enseñanza de ecuaciones diferenciales parciales, Sommerfeld impartía un curso especial (*Spezialvorlesung*) de dos horas semanales sobre temas de investigación. Exigía, en efecto, a sus alumnos, iniciarse en la propia investigación desde el comienzo. En ese marco expuso la estructura atómica y las líneas espectrales, el tema de su famoso libro cuya primera edición apareció en 1919 (*Atombau und Spektrallinien*), que ofrecía una exposición puntillosa del enorme material espectroscópico y su interpretación de acuerdo con la teoría cuántica "véterotestamentaria". Su aportación a ésta consistió principalmente en la sustitución, en el modelo atómico de Bohr, de la concepción de unas órbitas electrónicas circulares por órbitas elípticas (con el núcleo en un foco); introdujo un nuevo número cuántico azimutal. La elipticidad debía resultar en efectos relativistas que aparecerían en la estructura fina de los espectros atómicos.



Arnold Sommerfeld

Ese mismo año de 1919 Einstein (*The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 7. The Berlin Years: Writings, 1918-1921*) saboreó el apogeo de su gloria. Se emprendieron dos expediciones británicas para fotografiar el eclipse solar total y así someter a prueba la corrección de la teoría general de la relatividad. (Lo arriesgado de esta predicción einsteiniana y su espectacular ratificación, o no falsación, despertó a Karl Popper de su sueño logicopositivista, que se inspiró en la misma para su revolucionaria teoría de la ciencia.) Los resultados se presentaron en una reunión conjunta de la Regia Sociedad de Londres y de la Real Sociedad Astronómica el 6 de noviembre. Tras ese episodio consagrador, los escritos de Einstein dieron un giro. Hubo de hacer frente a una creciente demanda de artículos de divulgación y de conferencias sobre relatividad, su desarrollo y su significado; hubo de responder a una legión de comentaristas, desde físicos escépticos hasta filósofos y renombrados antirrelativistas, algunas de cuyas críticas estaban teñidas de antisemitismo.

Los textos científicos recogidos en este volumen de la edición de sus obras completas son anteriores al episodio astronómico y tienen que ver con las ondas gravitatorias (donde corrige lo publicado en 1916), los fundamentos de la teoría general de la relatividad (que reflejan la evolución de su pensamiento tras las apostillas de Willem de Sitter), el estatuto de las singularidades y la conservación del momento y de la energía. A principios de 1919, Einstein ofrecía un bosquejo de una teoría unificada de campos que requería modificar las ecuaciones de campo sobre la gravitación. Otro grupo de textos lo integran los escritos semipopulares y populares que exponían las ideas fundamentales de la teoría de la relatividad. Pero desde el año anterior viene intensificando su empeño por hallar una teoría unificada de campos de la gravedad y del electromagnetismo, un interés que vino promovido por la teoría de campos de Weyl, el primer ejemplo de lo que andando el tiempo se conocerá como teoría de aforo. En el dominio de la astrofísica, aborda, en 1921, la posibilidad de medir la constante cosmológica a través de observaciones astronómicas de la constante de gravitación.

Tuvo Einstein un intérprete precoz, que a los 18 años, siendo todavía alumno de bachillerato en el Gymnasium de Döbling, escribió un profundo ensayo "Sobre los componentes energéticos del campo gravitatorio", en el que hacía competente uso de la bibliografía especializada. Se trataba de Wolfgang Pauli (*No Time to be Brief*). ¿Quién fue su maestro? Enz señala a Hans Adolf Bauer, físico teórico, de quien recibió clases particulares en su época de instituto. Bauer, Schrödinger y Hans Thirring trabajaban entonces en relatividad y los tres aparecen citados en el artículo que Pauli redactó para la *Encyklopädie*. Del análisis interno del texto se infiere que se inspiró en el trabajo de Bauer y Schrödinger, quienes habían analizado las propiedades de los componentes de energía del campo gravitatorio en determinados casos.

Quien parece haber descubierto primero el talento extraordinario de Pauli fue su padrino Ernst Mach.

## El espacio

**A TRIBBLE'S GUIDE TO SPACE,** por Alan Tribble. Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2000.

Alan C. Tribble es un experto en cohetes. Ha diseñado docenas de naves espaciales para misiones diversas. Su propósito al escribir este libro, que no es el primero, fue ofrecer "los fundamentos de 'quién, qué, cuándo, dónde, por qué y cómo' respecto al programa espacial tal como se presenta en los albores del siglo XXI".

Ajena en su redacción a todo tecnicismo, la obra consigue ese objetivo entreteniendo y captando el ánimo del lector a través de casi 170 páginas, repartidas entre seis partes a las que el autor no llama capítulos, suponemos que por coherencia con el hecho de que cada una de ellas es un tema por sí misma, que puede leerse con independencia de las demás, sin que la obra dé la sensación de ser una especie de cajón de sastre; antes bien, la intención de conferir al conjunto una unidad de propósito no escapa a la percepción del lector.

La primera parte es una amena historia del espacio desde un divertido punto de vista antropocéntrico. Cabría aquí objetar y preguntar qué historia no es antropocéntrica, pero ésta se nos antoja especialmente antropocéntrica, ya que comienza hablando de las dimensiones de los límites de lo que llamamos espacio ultraterrestre, en función de nuestras percepciones más directas y terrestres, y los esfuerzos de los antiguos para estimar las dimensiones del sistema solar, para acabar informándonos de las calificaciones profesionales y los sueldos de los astronautas. Sigue una exposición de las vicisitudes que desembocaron en la presencia, parece que ya definitiva aunque desde luego incipiente, del hombre en el espacio, presencia cuyos inicios el autor sitúa a caballo entre los siglos XVI y XVII, cuando, ya abandonadas las teorías geocéntricas, los astrónomos comenzaron a recoger medidas exactas de los movimientos y posiciones de los planetas; pero el texto no se pierde luego en una relación más o menos completa de unos hechos, con sus nombres y fechas, que pueden resultar más o menos familiares, sino más bien se centra en las dificultades de índole técnica, científica si se quiere, que fue preciso salvar para conseguir esa presencia, y con qué "cosas" debe contar esa presencia cuando se consolide, y ahí es ineludible aludir a los agujeros negros.



Sistema de transporte espacial. Consta de nave y vehículo de lanzamiento.

La tercera parte trata de la navegación en el espacio; es decir, ¿cómo son los vehículos espaciales, cómo se propulsan, cómo se orientan, cómo fijan su posición? Las dos últimas preguntas se intentan responder proponiendo al lector situaciones de referencia sobre el suelo terrestre o en las proximidades de éste. La respuesta a las dos primeras se aprovecha para ofrecer una interesante exposición divulgativa acerca de los procedimientos de conversión de la energía de una forma a otra.

Y ahora que ya estamos en el espacio, en la cuarta parte de *A Tribble's Guide to Space*, ¿cómo es el espacio para el hombre desde un punto de vista medioambiental? Desde luego que echaremos de menos la atmósfera y la gravedad terrestres; y así, el texto expone lo que representan una y otra para los humanos, o sea, cómo interactúan con nuestro organismo, y cómo se salva esa carencia, sin olvidar la presencia en el espacio exterior de una radiación cósmica no atenuada por la atmósfera. Tampoco hay que olvidar, y de ello se trata también, los efectos que sufren los vehículos al traspasar la frontera del espacio exterior.

Finalmente, en las dos últimas partes se recapacita y se hacen algunas reflexiones de índole quizá política. En su estado actual, la presencia del hombre en el espacio es consecuencia de una sucesión de hechos cada uno de los cuales obedeció a un propósito fijado muy de antemano desde, digamos, el proyecto Mercury hasta el programa Apolo, presencia hoy materializada en la actividad de la Lanzadera Espacial, el telescopio Hubble y la Estación Espacial Internacional. Ahora bien, esa materialización no se reduce, se nos recuerda, a esos tres casos. Para quienes duden acerca de los beneficios que pueda reportarnos nuestra presencia en el espacio se recalca que dicha presencia ya rinde beneficios inmediatos: satélites meteorológicos, satélites de observación (predicción de cosechas, prospecciones arqueológicas...), sistemas de comunicaciones basados en satélites (el GPS, por ejemplo)... sin dejar de lado las posibilidades para actividades policiales. (Presencia además avalada por una abundante basura espacial en órbita alrededor de nuestro planeta.) La política ya no debe girar en torno a si debemos seguir, sino cómo debemos seguir, es decir, qué pasos dar y cómo dar esos pasos de modo coherente y, desde luego, económico (el costo de un solo despegue de la Lanzadera es del orden de mil millones de dólares).

—J. VILARDELL

Había éste aceptado en 1895 la cátedra vienesa de historia y teoría de las ciencias inductivas. Mach, sin embargo, no creía en la realidad de los átomos y se convirtió en antagonista de Boltzmann, su colega en física teórica y defensor de los fundamentos atómicos de la termodinámica. Mach, que orientó a su ahijado hacia la carrera de ciencias, estampó en su influyente *Tratado de mecánica* la siguiente dedicatoria en 1913: "Meinem lieben Patenkind Wolf in freundlichem Gedenken". A los 14 años Pauli, a quien

le enseñó matemáticas en privado Wilhelm Wirtinger, reconocido experto en teoría de funciones, dominaba ya el cálculo. Quizá Mach le influyera también en la inquietud filosófica, antimetafísica, que acompañó a Pauli toda su vida y que explica su intensa relación con C. G. Jung. (Pauli murió en 1958 con una biografía del representante máximo de la filosofía natural del Medievo, san Alberto, en las manos: *Der Magier*. *Das Leben des Albertus Magnus*, de R. Maungardt.) "Andando el tiempo, me sentí atraído por los textos científicos del XVII y también por los filósofos naturales griegos (*Naturphilosophen*)", escribirá a un viejo profesor del instituto.

Terminada la enseñanza media, se matriculó, en octubre de 1918, en la Universidad de Múnich, para formarse junto a Sommerfeld, jefe reconocido de la física teórica alemana.

"De la intelligentsia vienesa, apuntó Sommerfeld, llegó un sorprendente espécimen, el joven Pauli, hijo de un químico médico. Sus dotes superaban de lejos los de Debye (su propio ayudante y más tarde premio Nobel)." Durante su estancia en Múnich, frecuentó la vida nocturna de la ciudad. Solía llegar tarde a las clases de la mañana, con el tiempo justo para ver la pizarra y hacerse una idea de lo explicado, comportamiento díscolo que Sommerfeld le toleraba. En el semestre de verano de 1919, cursó "ecuaciones diferenciales parciales" y "relatividad", para estudiar en los siguientes "óptica", "dinámica y redes cristalinas", "electrodinámica", "teoría de rayos X" y "electroóptica y magnetoóptica". No asistió a las clases de mecánica y mecánica de los medios deformables, materias que Pauli había aprendido en el libro de Mach. En julio de 1921 pasó el examen oral con

## La naturaleza y sus constantes

**THE CONSTANTS OF NATURE,** por John Barrow. Vintage; Londres, 2003.

John Barrow es un físico distinguido conocido también por la calidad de sus libros de divulgación, escritos en solitario o con algún colega. Este es probablemente su libro de divulgación más reciente y se dedica a explicar de forma amena y muy bien documentada lo que significan las constantes de la naturaleza y cómo sería nuestro universo si cambiásemos algunos de sus valores. Estas cuestiones siempre han sido debatidas, con mayor o menor seriedad, por los científicos y, en particular, físicos dedicados a la investigación fundamental. Considero, sin embargo, que aún no ha llegado el momento de entender realmente lo que significan las constantes y posiblemente no llegue hasta que tengamos una teoría cuántica que unifique todas las interacciones y de la que emerjan en distintos límites las diferentes teorías (con sus constantes) que conocemos hoy en día.

El texto, muy atractivo, contiene abundantes citas bien escogidas. Incluso un físico informado y documentado encuentra en él material y resultados que no son muy conocidos. Quizá debamos lamentar que no esté suficientemente claro su *leitmotiv,* ya que a veces las constantes parecen una excusa para contar algo, interesante y curioso, pero que encaja con dificultad en un todo que tenga una unidad conceptual.

Por deformación profesional me hubiera gustado ver los valores numéricos de las constantes dados con sus errores y leer algo sobre la posibilidad de escoger sistemas de unidades en los que ciertas constantes se escogen igual a la unidad y sin error, como suelen hacer los físicos teóricos con la velocidad de la luz y la constante de Planck. También he echado en falta, dado el título del libro, una discusión de las consecuencias del grupo de renormalización para la 'constancia' de ciertas constantes, como la de estructura fina, que realmente es una función de la energía característica del experimento que la mide.

Pero el libro está lleno de historias escritas con un humor exquisito y con una excelente perspectiva científico-escéptica: la de la coincidencia numérica de la aparición del nombre de Shakespeare en la versión inglesa de la Biblia es un buen ejemplo. Barrow también cuenta muchas anécdotas que muestran cómo científicos de primera categoría pueden enamorarse de ideas totalmente absurdas y defenderlas *ad nauseam* durante años. Me encantó la respuesta de Kramers a Goudsmit cuando éste le preguntó si los físicos pierden el norte cuando envejecen: "Un genio como Eddington quizá se vuelva loco, pero alguien como tú simplemente se vuelve más y más estúpido". A recordar.

El principio antrópico ocupa un lugar preeminente en el libro, algo esperable conociendo la trayectoria del autor. Yo soy de aquellos a quienes les parece su versión débil (el universo que observamos es de tal forma que permite la existencia de observadores) una obviedad que no deja de serlo por mucho significado profundo que se le quiera dar y la versión fuerte (el universo debe ser de tal forma que permita la presencia de observadores) un insulto a todo el desarrollo científico desde Galileo. Recomiendo la lectura de Steven Weinberg y Richard Dawkins sobre la total ausencia de evidencia teleológica en la naturaleza. Barrow aprovecha este principio para entretener magistralmente al lector, sin dejar muy clara su propia opinión, aunque pone como ejemplo de un argumento antrópico una frase notoria del presidente George W. Bush: "Tengo fuertes opiniones propias, pero no siempre coincido con ellas".

El texto contiene comentarios marginales que demuestran que el autor es un científico de amplio espectro y muy leído y que producen las delicias del lector. Cuando dice que "acontecimientos históricos involucran actores dotados de libre albedrío, o al menos dotados de la ilusión de él", se presenta como conocedor de varios experimentos que parecen indicar que la actividad cerebral es la causa del (aparente) libre albedrío y no al revés. La narración de la historia del reactor natural de Oklo es posiblemente la mejor que he leído y es una perfecta introducción al tema de la posible variación temporal de las constantes. En resumen, un libro bien documentado, divertido, entretenido y que contiene algunas perlas que sorprenderán incluso a científicos añejos.

—ROLF TARRACH

la máxima calificación en todas las materias. Como recordaba Lisa Meitner ese mismo año, el "discípulo no podía aprender más del maestro". Pero éste había logrado que su grupo, con el tiempo, "dispersado a ambos lados del Atlántico... no sólo nos encontraremos con los números enteros como en casa, sino también con el uso que hizo del plano complejo, la evaluación de las integrales de fase o las soluciones de las ecuaciones diferenciales" (Pauli). Con motivo del septuagésimo cumpleaños de Sommerfeld, le escribirá agredecido: "Recordaré siempre lo que usted me ha inspirado desde nuestro primer encuentro en 1918... Los años transcurridos en Múnich distan de haberse agotado".

Antes de graduarse había trabajado ya sobre el magnetismo, sobre el diamagnetismo en particular. "Me alegra saber que ha vuelto al magnetismo, olvidado durante tanto tiempo, con la aportación de nuevos resultados. Carecería de sentido que trabajáramos en paralelo en un tiempo en que la creación de modelos constituye una tarea lo suficientemente amplia como para recomendar una económica división del trabajo." Con estas palabras agradecía Schrödinger la llegada a Jena de Pauli el 12 de julio de 1920. Con mayor concreción, prosigue Schrödinger: "Leo con especial atención su nota sobre el diamagnetismo. Me parece que, con el helio, por ejemplo, las órbitas de Bohr no bastan para explicar un diamagnetismo moderadamente intenso". La nota sobre el diamagnetismo, remitida por Pauli desde Múnich, investigaba los gases monoatómicos, excluyendo los gases moleculares y los estados no gaseosos en razón de los acoplamientos interatómicos. Los cálculos de Pauli se basaban en la vieja teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld sobre las órbitas elípticas estacionarias de los electrones alrededor del núcleo. En su segundo escrito sobre el magnetismo abordaba los gases paramagnéticos, cuyos átomos poseen un momento magnético permanente **m** producido por un momento angular **J** no nulo, resultante de todas las órbitas electrónicas del átomo. La novedad de ese artículo estriba en que Pauli presentaba como unidad para medir los momentos magnéticos lo que él denominó el magnetón de Bohr.



Wolfgang Pauli y Albert Einstein. Otoño de 1926.

Por tesis de doctorado se propuso resolver un problema fundamental, a saber, cribar si la teoría de Bohr y las condiciones cuánticas de Bohr-Sommerfeld conducían a un resultado experimentalmente correcto. Expresado con la elegancia humanística del círculo de Múnich, se planteó averiguar qué es lo que había detrás de la "música de las esferas" de la que hablaba Sommerfeld en el prefacio de su *Atombau und Spektrallinien*.

A ello se entregó desde su primer cargo académico, ayudante de Max Born en Göttingen. El resumen de su memoria ("Über das Modell des Wasserstoffmolekülions") apareció en el número de *Annalen der Physik* correspondiente al año 1922. En Göttingen, colaboró con Born en la formulación de una teoría general de perturbaciones, siguiendo las pautas marcadas por Henri Poincaré. Pasó en Göttingen sólo un invierno, aceptando la invitación de Wilhelm Lenz para trasladarse a Hamburgo en abril de 1922. Abordó entonces el efecto Zeeman anómalo. En ello andaba cuando tuvo una idea revolucionaria: ¿qué sucedería si la causa de todo el problema en torno a la estructura compleja no residiera en el núcleo atómico, sino en el electrón de valencia? ¿Qué pruebas había de tal posibilidad? En 1924, antes de descubrirse el espín del electrón, Pauli propuso apoyarse en la hipótesis de un espín nuclear para explicar la estructura hiperfina de las líneas espectrales.

Su aportación magistral, sabido es, estribó en el principio de exclusión que lleva su nombre. "Con la ayuda del principio de exclusión, entendemos ahora la estabilidad de la materia en dos escalas, primero la escala atómica... y segundo la escala de la experiencia humana. Sólo queda por explicar la cuestión de la estabilidad en una tercera escala, la escala de la astronomía y de la cosmología" (Freeman Dyson). La importancia del principio de exclusión para comprender el mundo material reseñada por Dyson no fue, evidentemente, percibida cuando Pauli formuló el principio en las postrimerías de 1924. Lo formuló de una manera negativa: "No puede haber nunca dos o más electrones equivalentes en el átomo, en que, en un campo intenso, los valores de todos los números cuánticos $n$, $k_1$, $k_2$, $m_1$ (o para lo que es igual $n$, $k_1$, $m_1$, $m_2$) coincidan. Si un electrón se encuentra en el átomo, para el que estos números cuánticos (en el campo externo) tienen valores definidos, entonces este estado se halla 'ocupado'". Y añade: "Nos sentimos incapaces de ofrecer una justificación más rigurosa de esta regla; pero parece brotar autónomamente de una manera natural".

—LUIS ALONSO

# AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

## Parrilla de salida

Imaginemos una red de carreteras compuesta por seis vías paralelas que corren de norte a sur separadas entre sí 10 kilómetros. Pasan sobre otras seis perpendiculares a ellas: corren de este a oeste con la misma separación. En cada cruce existen enlaces que permiten la entrada y la salida. Como no hay semáforos, se abandona una calle y se toma la transversal en un tiempo que cabe considerar nulo. Aunque apenas hay tráfico, la velocidad está rigurosamente vigilada.

Las limitaciones de velocidad siguen una curiosa reglamentación. En la calle más meridional de las que van de este a oeste el límite es de 10 km/h; en la paralela inmediata a su norte, es de 20 km/h, y así en progresión aritmética (por lo que la velocidad máxima de la calle más septentrional es de 60 km/h). Otro tanto vale para las calles que corren de norte a sur: en la más occidental el límite es de 10 km/h, y es de 60 km/h en la más oriental. Los cruces se denotan por la columna y la fila a la que pertenecen. Así, el cruce situado en el vértice suroccidental es (1,1); el vértice suroriental es (6,1); el noroccidental es el (1,6) y así los demás. Como ejercicio de calentamiento, ¿cuál sería el camino más rápido para ir desde (1,1) a (6,3)?

Existen en este caso varias rutas igualmente rápidas. Una de ellas invierte una hora en ir desde (1,1) a (2,1), otra hora en ir de (2,1) a (2,3) y, por último, una hora y veinte minutos para ir desde (2,3) hasta (6,3). La ruta directa más lenta (es decir, que cubre la misma distancia que las rutas más rápidas) va desde (1,1) hasta (6,1) en 5 horas, y luego hasta (6,3) en veinte minutos más.

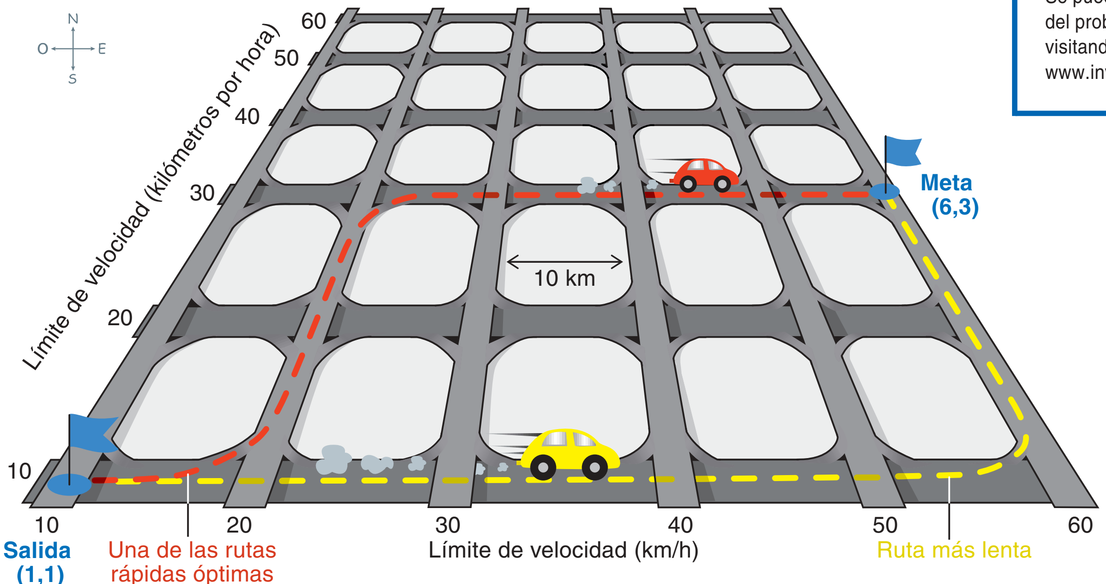
El problema consiste en partir de (1,1) y visitar todos los cruces en el menor tiempo posible. ¿Cómo hacerlo? ¿Se podría reducir el tiempo necesario para visitar todos los cruces partiendo de algún otro vértice? Presumo que no, por lo que vería con mucho agrado una demostración elegante de que esa conjetura es cierta. (A menudo, las conjeturas resultan falsas.)

### Solución del problema del mes pasado:

Codifique su mensaje mediante un número, que será la coordenada *x* de un punto *P* del espacio tridimensional. Seleccione al azar otras dos coordenadas. Defina ahora cinco planos que pasen todos por *P*, y asigne cada plano a un correo distinto. Para definir cada plano se pueden usar las coordenadas de tres de sus puntos, ninguno de los cuales debe ser *P*.
Dos planos no paralelos se cortan en una recta; todo plano que no contenga a esa recta, pero la interseque, definirá un punto en ella. El conocimiento de los planos de dos correos cualesquiera no proporciona información suficiente para definir *P*; en cambio, con tres correos sí pueden hallar fácilmente el punto crítico, determinar, pues, la coordenada *x* de *P* y descifrar el mensaje.

### Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.




CORNELIA BLIK

A vueltas por la ciudad. Se ha indicado en rojo una ruta que resuelve el problema preliminar. La ruta amarilla corresponde a la trayectoria más lenta que recorre la misma distancia. Ahora bien, ¿cuál es la forma más rápida de visitar todos los cruces?



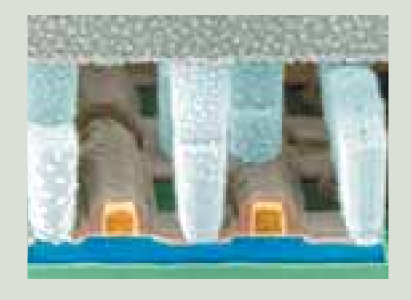



**LA OTRA MITAD DEL CEREBRO,**
por R. Douglas Fields

Cada vez hay más pruebas de que las células gliales, dejadas en un segundo plano durante medio siglo, desempeñan en el pensamiento y el aprendizaje un papel casi tan importante como las neuronas.

LOS COMPONENTES OCULTOS DE LOS SISTEMAS PLANETARIOS,
por David R. Ardila

En el sistema solar no sólo hay planetas; existen también enjambres de asteroides y cometas. ¿Será éste el caso de otros sistemas planetarios?



LOS PRIMEROS NANOCHIPS,
por G. Dan Hutcheson

El constante avance técnico hacia la miniaturización se interna ya en el orden de los nanómetros.

EL TRANSITO DE VENUS, por Steven J. Dick

Este mes de junio, cuando Venus cruce ante el disco solar, se recordará uno de los grandes capítulos de la historia de la astronomía.

ALBERTO MAGNO, EL GRAN CURIOSO,
por Birgit Steib y Roland Popp

En los escritos del naturalista y filósofo medieval se pueden reconocer los inicios de una ciencia natural orientada hacia la experiencia.

